МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
Ульяновский государственный педагогический институт
имени И. Н. Ульянова

ФИЗИКА в ШКОЛЕ и ВУЗЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ том XX, вып. 3

Ульяновск, 1969

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
Ульяновский государственный педагогический институт
имени И. Н. Ульянова

ФИЗИКА в ШКОЛЕ и ВУЗЕ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ том XX, вып. 3.

Ульяновск, 1969

Редакционная коллегия: **Т. А. Безрукова, Н. А. Демокритов, В. Ф. Лысов, Ц. М. Рабинович** (ответственный редактор).

Предлагаемый выпуск «Ученых записок» содержит ряд методических работ по курсу средней школы. В них идет речь о методике изложения важных тем школьной программы «Ядерная энергия», «Полупроводники», «Спектры», «Инерционные механизмы», о методике проведения контрольных работ по физике, а также о новых демонстрациях по физике и астрономии.

Раздел «Консультация» посвящен одной из актуальных тем теоретической механики «Движение материальной точки в поле центральной силы». В статье даны теоретические расчеты условий запуска искусственных спутников Земли.

В сборнике обобщен опыт применения электронных экзаменаторов на кафедре физики Ульяновского пединститута. Для обсуждения помещена одна глава из учебного пособия «Оптика» — с программой самоконтроля.

Ценной для учителей физики является библиографическая работа «Указатель литературы по демонстрационному эксперименту на уроках физики в VI классе по программе 1968 г.». В целом сборник представляет интерес для преподавателей физики школ и вузов.

I. МЕТОДИКА

Н. А. ДЕМОКРИТОВ

ИНЕРЦИОННЫЕ («ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ») МЕХАНИЗМЫ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

Изучение так называемых «центробежных» механизмов в курсе механики 9-го класса имеет большое политехническое значение и этому вопросу следует уделять серьезное внимание. Но по ряду причин эти механизмы изучаются в школе поверхностно, и учащиеся отчетливых представлений о их действии часто не имеют.

Методическим затруднением для учителя является то, что они имеют неудачное название — «центробежные», воспринимаемое учащимися как указание на основную причину их действия, что неверно. Причем учителю приходится вводить термин «центробежные» до ознакомления учащихся с понятием центробежная сила.

Чтобы избежать указанные методические трудности, в настоящей работе рассматриваемые механизмы, там где это необходимо, называются инерционными, а «центробежная» машина — вращательной машиной. Название вращательная машина в методику введено уже давно, а название инерционные механизмы целесообразно ввести, так как оно отражает главную причину действия этих механизмов.

Материал статьи не предназначен для разбора его полностью на уроках, для этого у учителя нет времени, да в этом и нет необходимости. Руководствуясь программой по физике, учитель сам определит, что следует включить в учебный материал уроков, что ввести в решение задач и что использовать во внеклассных занятиях.

Чтобы не повторять при разборе действия каждого механизма, будем одновременно выяснять и центростремительную и центробежную силы. С учащимися, как уже принято в нашей методике, сначала изучается лишь центростремительная сила. Учитель объясняет, что на движущееся по круговому пути тело может действовать одновременно несколько различных сил, но всегда их равнодействующая бывает направлена к центру кривизны траектории; она-то и выполняет роль центростремительной силы. Этот вывод поясняется и закрепляется при рассмотрении разбираемых ниже специальных установок и механизмов.

Последние уроки изучения темы (примерно два) отводятся на ознакомление учащихся с центробежной силой. При этом она рассматривается с точки зрения третьего закона механики как сила, противодействующая центростремительной, как сила действия обращающегося тела на удерживающие его связи.

Понятие о центробежной силе инерции, приложенной к обращающемуся телу, с учащимися средней школы не рассматривается. Термин «центробежное движение» на уроках в школе применять не следует, так как он, не вскрывая истинной причины движения, создает у учащихся ложное представление о движении под влиянием центробежной силы.

Изложение материала статьи выдержано главным образом в форме беседы, так как метод беседы с демонстрацией является наиболее эффективным при объяснении учащимся подобного материала. В описании не приводятся все вопросы, которые учитель может поставить перед учащимися, разбирая тот или иной механизм. Здесь дается лишь примерный план беседы с ними.

Цилиндр, скользящий по стержню

Прямолинейный горизонтально расположенный стержень закрепляется одним концом на оси вращения. На стержень надевается цилиндр (или шар), который может скользить по нему без большого трения (рис. 1). Объяснив учащимся устройство прибора, учитель обращается к ним с вопросом:

— Что произойдет с цилиндром и стержнем, если мы ударим цилиндр в направлении под некоторым углом к

линии стержня? Возможные ответы учащихся проверяются экспериментом. Опыт показывает, что в этом случае цилиндр соскальзывает со стержня в направлении удара, а стержень приходит во вращательное движение.

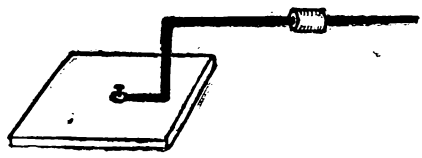


Рис. 1.

— Как будут двигаться цилиндр и стержень, если аналогичный удар будет произведен о стержень?

Во время демонстрации учащиеся убеждаются, что цилиндр и стержень приходят в такое же движение, как и в первом случае.

— Что произойдет с цилиндром, если мы приведем стержень во вращательное движение?

— Он слетит со стержня. Ответ подтверждается экспериментом.

— По какой причине во всех рассмотренных случаях цилиндр, соскальзывая со стержня, удаляется от оси обращения?

— Причиной удаления цилиндра от оси обращения во всех рассмотренных случаях является его движение по инерции вследствие полученного толчка, безразлично от руки или от стержня.

Разбирая это явление, следует обратить внимание учащихся на то, что вращающийся стержень действует на цилиндр подобно длительному ряду последовательных толчков в направлении касательных к траектории движения. В этом направлении всегда и наблюдается движение по инерции цилиндра, слетевшего со стержня.

Продолжаем демонстрацию с тем же прибором, но свободный конец стержня загибаем под прямым углом или на него навинчиваем гайку.

— Какие силы действуют на неподвижный цилиндр, находящийся на стержне?

— На неподвижный цилиндр действует сила тяжести и сила реакции стержня. Эти две силы взаимно уравновешиваются.

Устанавливаем цилиндр, примерно, на середине стержня и приводим его в медленное обращение так, чтобы он по стержню не перемещался.

— Почему цилиндр не перемещается по стержню? Какая сила удерживает его на круговой траектории?

— Цилиндр удерживает на стержне сила трения покоя. Будучи приложенной к цилиндру со стороны стержня в направлении к центру обращения она является центростремительной силой. Сила трения покоя удерживает цилиндр, так как ее величина, очевидно, равна или больше расчетной величины $F_{ц.с.} = m\omega_1^2 R$, соответствующей малой угловой скорости обращения.

— Согласно 3-му закону механики действующей на цилиндр центростремительной силе должна соответствовать приложенная к связи центробежная сила.

— Что выполняет роль центробежной силы?

— Роль центробежной силы при неподвижном относительно стержня цилиндре выполняет тоже сила трения покоя, но приложенная к стержню (со стороны цилиндра) и направленная от центра обращения.

— Увеличиваем угловую скорость обращения стержня. Цилиндр скользит по нему и останавливается у упора.

— Что является причиной скольжения цилиндра по стержню?

— Причиной движения цилиндра по стержню является инерция. Как и в первых опытах, он получил от стержня «серию толчков» и по инерции пришел в движение по направлению касательной к круговой орбите. Существующая сила трения покоя оказалась недостаточной, чтоб обеспечить центростремительную силу $F_{ц.с.} = m\omega_2^2 R$, соответствующую возросшей угловой скорости.

— Что выполняет роль центростремительной силы, действующей на цилиндр, находящийся в конце стержня у упора?

— На цилиндр, находящийся у упора, действует сила давления упора, направленная к центру обращения, она и есть центростремительная сила.

— Что в этом случае выполняет роль центробежной силы?

— Роль центробежной здесь выполняет сила давления цилиндра на упор. Она приложена к упору и направлена по радиусу от центра обращения. Аналогично пре-

дыдущему объясняется и движение по столу шара с пружиной.

Вращающийся диск с грузами

На горизонтальный диск, укрепленный во вращательной машине, на равных расстояниях от оси вращения, кладутся три спичечных коробки: с песком, со спичками и пустая.

— Какие силы действуют на спичечные коробки при неподвижном диске?

— При неподвижном диске на спичечные коробки действуют взаимно уравновешивающиеся сила тяжести и сила реакции диска.

Слабыми рывками руки сообщаем диску и через него спичечным коробкам небольшие толчки.

— Почему спичечные коробки от получаемых толчков не слетают с диска по инерции?

— При малых толчках или медленных оборотах диска спичечные коробки удерживает на диске сила трения.

— Что выполняет при этом роль центростремительной силы?

— Роль центростремительной силы выполняет сила трения покоя, приложенная к коробкам со стороны диска.

— Что выполняет роль центробежной силы?

— Роль центробежной силы выполняет сила трения, но приложенная к диску со стороны коробок.

— Если будем увеличивать угловую скорость вращения диска, то до каких пор сила трения сможет удерживать коробки на вращающемся диске?

— Сила трения покоя, являющаяся центростремительной силой, до тех пор будет удерживать коробки на диске, пока ее величина не окажется меньше расчетной величины центростремительной силы, соответствующей фактической угловой скорости $F_{ц.\,с.} = m\omega^2 R$.

— Если постепенно увеличивать угловую скорость вращения диска, то спичечные коробки одновременно слетят с нее или в какой-либо последовательности?

— После обсуждения вопроса производим опыт, и учащиеся наблюдают, что первой слетает коробка с песком, второй — со спичками и последняя — пустая. (В этом опыте можно ограничиться двумя коробками: с песком и пустой).

— Чем объясняется такая последовательность падения коробок с диска?

— Роль центростремительной силы здесь выполняет сила трения, а она зависит от давления, давление же зависит от веса. Следовательно, можно было бы ожидать обратной последовательности падения коробок. Но здесь преобладает явление инерции. При одинаковой окружной скорости большая масса (коробка с песком) обладает большей инерцией движения и потому она первой слетает с диска.

— В каком направлении и почему слетают с диска коробки?

— Спичечные коробки слетают с диска по направлению касательной к круговой траектории, потому что при криволинейном движении скорость направлена по касательной, и коробки, слетев с диска, движутся в этом направлении.

Расположив на диске спичечные коробки одинаковых масс на разных расстояниях от оси обращения, можно показать учащимся прямую зависимость величины центростремительной силы от радиуса (при постоянной для каждой коробки угловой скорости ω). Чем больше радиус обращения, тем больше величина расчетной центростремительной силы и тем быстрее конечная сила трения окажется меньшей этой величины.

Шар с разнородными жидкостями

Перед демонстрацией учитель объясняет учащимся устройство прибора и вспоминает с ними плотности жидкостей и воздуха, находящихся в сосуде. Учитель обращает внимание учащихся на то, что в неподвижном сосуде, несмешивающиеся вещества распределяются в соответствии с их плотностью.

Непосредственно перед демонстрацией учитель спрашивает учащихся:

— Как распределятся находящиеся в сосуде вещества, если сосуд приведем во вращение?

Возможные ответы учащихся проверяются экспериментом, после чего причина наблюдаемого распределения веществ в сосуде выясняется следующим образом:

— Что можно сказать про угловую скорость вращения частиц жидкости и сосуда?

— Угловая скорость вращения сосуда и находящихся в нем веществ, при установившемся движении, одинаковая.

— По какой причине вещества в сосуде приходят в движение?

— Вещества в сосуде приходят в движение по инерции от толчков, сообщаемых им при вращении сосуда.

— От чего зависит величина инерции каждой единицы объема веществ, находящихся во вращающемся сосуде?

— Величина инерции каждой единицы объема вещества зависит от его массы, или точнее, от плотности вещества. Чем больше плотность вещества, тем больше инертность каждой единицы его объема.

— Что является причиной наблюдаемого распределения жидкостей и воздуха во вращающемся сосуде?

— Причиной наблюдаемого распределения веществ во вращающемся сосуде является различная по величине инерция их движения. Вещество большей плотности (ртуть) обладает большей инерцией движения и, отходя от оси обращения на наибольшее расстояние, она вытесняет вещества меньшей инертности. Наименьшей плотностью, следовательно, и наименьшей инерцией обладает воздух, поэтому он оказывается в пространстве, ближайшем к оси обращения.

— Как проявляются центростремительная и центробежная силы при установившемся вращении прибора?

— Вещества, заключенные в сосуде, удерживаются на круговых траекториях стенками сосуда (связь). Давление стенок сосуда на находящиеся в нем вещества есть центростремительная сила, а давление жидкостей на стенки сосуда — есть центробежная сила.

Учителю следует иметь в виду, что центростремительная и центробежная силы в этом случае имеют место лишь при наличии в сосуде веществ, обращающихся вокруг оси сосуда. Если представить себе пустой сосуд, то в целом к нему представление об этих силах будет неприложимо, так как в этом случае мы будем иметь не обращение, а вращение вокруг собственной оси. В этом случае можно говорить о центростремительных и центро-

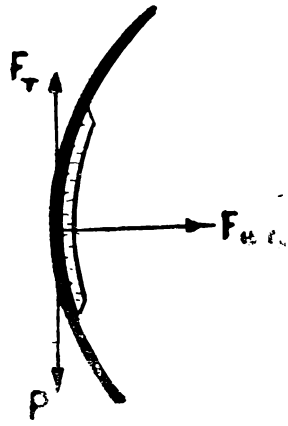


Рис. 2

бежных силах, действующих между частицами вещества прибора.

Полезно с учащимися выяснить направление сил, действующих на жидкость во вращающемся сосуде. Это силы: вес жидкости — P, сила трения $-F_т$ и сила давления стенки сосуда—F (рис. 2).

Модель центрифуги

Учащиеся знают причину наблюдаемого распределения жидкостей во вращающемся шаре, и, следовательно, принцип действия центрифуги им известен. Учитель готовит на глазах учащихся взвесь из воды и порошка мела, наливает ее в пробирки, обращает внимание учащихся на ее однотонный, молочный цвет и приводит прибор в быстрое вращение в продолжение 3—4 минут (рис. 3).

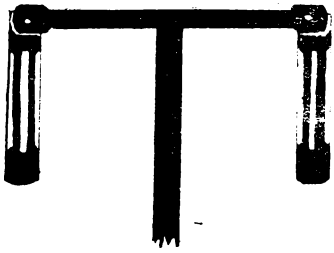


Рис. 3

Вынув пробирки из их футляров и показывая их учащимся, учитель начинает беседу:

— Что вы скажете об изменении цвета мелового раствора после вращательного движения центрифуги?

— После вращения прибора цвет раствора изменился. из молочного он стал водянистым.

— Чем объясняется изменение цвета мелового раствора после его быстрого кругового движения?

— Налитая в пробирки смесь мела и воды во время кругового движения разделилась. Твердые частицы мела, как частицы большей плотности (по сравнению с водой),

по причине большей инерции, удалились от оси обращения на максимально возможное расстояние и осели на дно пробирок.

— В чем проявляется центростремительная сила при установившемся обращении пробирок центрифуги?

— Для отдельных частиц мела, взвешенных в воде, центростремительной силой является сила их молекулярного сцепления с частицами воды. Эта сила очень мала, поэтому частицы мела быстро отделяются и отлетают на дно пробирок. Во время кругового движения жидкость удерживается давлением на нее со стороны дна и стенок пробирок. Давление со стороны стенок взаимно уравновешивается, а давление дна оказывается центростремительной силой.

— В чем проявляется центробежная сила при установившемся вращении прибора?

— При установившемся вращении прибора роль центробежной силы осуществляет давление жидкости на дно пробирок, через них оно передается на футляр и на другие, удерживающие пробирки связи.

В заключение учитель сообщает учащимся некоторые примеры практического применения центрифуг в нашем хозяйстве.

Инерционная сушилка

Объяснив устройство и действие прибора и указав на его назначение, учитель выясняет с учащимися принцип его действия примерно в следующей форме.

— Если положить в сетку сушилки мокрую тряпку и начать медленно вращать прибор, отделится ли вода от тряпки?

— При медленном вращении прибора вода из тряпки не отделится. Учитель медленно вращает прибор, и учащиеся убеждаются в правильности ответа.

— Какая сила удерживает воду в тряпке при медленном вращении сушилки?

— Воду в тряпке удерживают силы сцепления молекул воды и тряпки.

— Что нужно сделать для преодоления этих сил, для отделения воды от тряпки?

— Для отделения воды от тряпки сушилку следует привести в такое быстрое вращение, чтоб инерция движе-

ния частиц воды оказалась больше сил молекулярного сцепления. Тогда частицы воды будут отрываться от тряпки и по инерции разлетаться по касательным к круговой траектории.

Учитель быстро вращает сушилку в течение, примерно, 1,5—2 минут, затем вынимает из сушилки сетку с тряпкой, освобождает стеклянный сосуд сушилки и выливает из него воду (так, чтобы это было видно учащимся).

Учащиеся при этом обычно спрашивают: сухая ли стала тряпка? Учитель поясняет, что в прачечных для полной просушки белья его кладут в сушильные барабаны диаметром около метра и вращают их не рукой, а с помощью электромотора, со скоростью несколько сотен оборотов в минуту, при этом вода из белья удаляется полностью.

В заключение определяют действующие центростремительные и центробежные силы.

Дуговой желоб с двумя шариками

В неподвижном приборе шарики лежат на дне; действующие на них силы взаимно уравновешены. Когда прибор начинаем вращать, лежащие в нем шарики поднимаются вверх и при соответствующей скорости вращения оказываются как бы висящими около вертикальных стенок желоба (рис. 4).

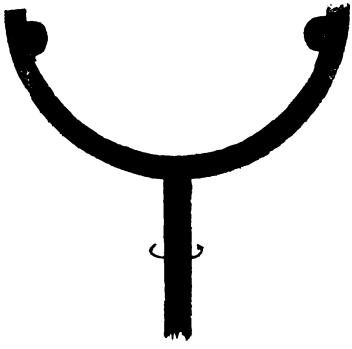


Рис. 4

— Какова причина движения шариков вверх по стенкам желоба?

— Во время вращения прибора на шарики действует сила по направлению касательной к их круговой траектории. В результате каждый шарик совершает сложное движение: вместе с кольцом он участвует во вращательном движении и в каждый момент времени по инерции отходит от оси обращения по направле-

нию касательной к круговой траектории. Этим и объясняется причина подъема шариков вверх по стенкам желоба.

— Какие силы действуют на шарики, находящиеся в движении?

— При большой скорости вращения прибора шарики оказываются прижатыми к вертикальным стенкам желоба, в это время на них действуют: сила тяжести, сила трения и сила давления стенок желоба.

— Что здесь является центростремительной и центробежной силами?

— Давление стенок желоба на шарики — центростремительная сила, а давление шариков на стенки желоба — центробежная сила.

Прибор для демонстрации инерции тел при круговом движении

Прибор представляет собою металлическую скобу со штуцером для закрепления в муфте вращательной машины. Через скобу продевается стержень для надевания на него различных грузов (рис. 5). К прибору должны быть приложены пять грузов-шариков (или цилиндров).

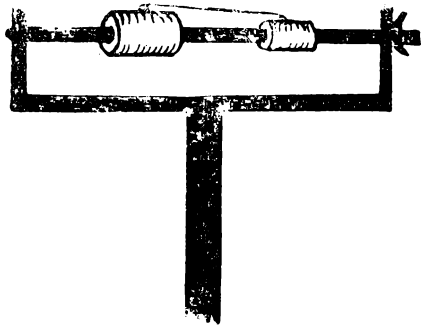


Рис. 5

1. Два шарика равного объема и равной массы (например, оба из железа).

2. Один шарик того же объема, что и первые два, но меньшей массы (например, из алюминия).

3. Один шарик меньшего объема, но большей массы (например, из свинца).

4. Один шарик малой массы, но большого объема (например, из пенопласта) со сквозной прорезью диаметра несколько большего, чем диаметр шарика из свинца.

Учитель ставит перед учащимися задачу исследовать зависимость между массой тел и их инерцией при вращательном движении.

Поместим на стержень два тела равных масс, на одинаковых расстояниях от оси вращения прибора.

— Что произойдет с грузами, если привести их во вращательное движение?

— Грузы по инерции должны удалиться от оси обращения к упорам.

Проводим демонстрацию, и учащиеся убеждаются в правильности своего предположения. Соединяем эти же грузы шнуром и устанавливаем их, как и в первом случае, на равных расстояниях от оси обращения.

— Что произойдет с грузами, связанными нитью и расположенными на равных расстояниях от оси обращения?

— Грузы должны остаться на своих местах. Демонстрация подтверждает это предположение.

— Что является центростремительной силой, действующей на каждый из грузов?

— Каждый из грузов удерживается на своем месте силой натяжения шнура, или точнее, инерцией соединенного с ним через шнур другого груза, находящегося по другую сторону оси обращения. Сила натяжения шнура для каждого из грузов и является центростремительной силой (частично эту же роль выполняет и сила трения грузов о стержень).

— Что здесь является центробежной силой?

— Центробежной силой называется сила действия вращающегося тела на связь. В нашем опыте связью для обоих грузов служит соединяющий их шнур. Следовательно, сила натяжения каждым грузом шнура есть центробежная сила. Равные центробежные силы действуют на шнур в противоположных направлениях и взаимно уравновешиваются.

Изменяем условия опыта: располагаем грузы на различных расстояниях от оси прибора.

— Что произойдет с грузами при различных расстояниях от оси обращения? Учащиеся могут предположить, что груз, находящийся дальше от оси обращения, «перетянет» второй груз. Проверяем это предположение экспериментом и убеждаемся в его истинности. Объясняя это явление, отмечаем, что инерция обращающегося тела при данной окружной скорости зависит не только от его массы, но и от радиуса обращения.

Надеваем на стержни грузы различной массы и располагаем их на равных расстояниях от оси прибора.

— Что произойдет с обращающимися грузами в этом случае?

— Груз большей массы обладает большей инерцией по сравнению с меньшим грузом. Следовательно, центростремительная сила, действующая со стороны меньшего груза, его не удержит, он должен уйти к упору и перетянуть за собой меньший груз. Вращая прибор, убеждаемся в правильности предположения: при одинаковой угловой скорости большая масса обладает большей инерцией.

— Что является центростремительной и центробежной силами при положении грузов у упора?

— Больший груз, находящийся у упора, удерживает сила давления со стороны упора (сила упругости), малый груз удерживает давление со стороны большего груза — это центростремительные силы.

Сила давления малого груза на больший и большего на упор (сила упругости) — есть центробежные силы.

— Можно ли расположить на стержне грузы различной массы так, чтобы во время кругового движения они оставались на месте, то есть, чтобы инерция их движения оказалась одинаковой?

— Очевидно, для этого меньший груз надо расположить дальше от оси обращения по сравнению с большим грузом.

Располагаем грузы на стержне на расстояниях от оси обращения обратно пропорциональных их массам и убеждаемся, что при круговом движении они, в этом случае, относительно стержня остаются неподвижными. Очевидно, в этом случае, инерция их движения одинаковая.

Вспоминаем пройденное ранее.

— Отчего зависит инерция тел в прямолинейных движениях?

— В прямолинейных движениях инерция тел (при постоянной скорости) зависит от их массы.

— Сопоставим этот вывод с результатами последнего опыта. Отчего зависит инерция тел при круговых движениях?

— Опыт показывает, что в круговых движениях инерция тел зависит от их массы и от радиуса обращения.

Таким образом, учитель вплотную подводит учащихся к представлению о моменте инерции вращающихся тел ($I = \sum_{1}^{n} m_i r_i^2$).

Так как связанные шнуром грузы обращаются вокруг общего центра тяжести (вокруг центра инерции системы), то их движение может служить моделью движения двух космических тел (например, Земли и Луны, пары двойных звезд и т. д.). Связь между грузами в опыте посредством шнура аналогична притяжению между космическими телами по закону всемирного тяготения.

В заключение интересно поместить на стержне груз, большой по объему, но малый по массе (из пенопласта), с большим отверстием по оси и малый по объему, но большой по массе груз (из свинца), причем, поместить таким образом, чтобы они были по одну сторону от оси прибора и больший по объему груз был ближе к упору. После нескольких секунд быстрого кругового движения грузов учащиеся с интересом увидят, что груз большей массы окажется у упора, внутри прорези легкого груза.

Грузы на угловом стержне

Груз А надет на горизонтальную часть стержня, а груз В — на его вертикальную часть. Оба груза связаны шнуром, перекинутым через блок, укрепленный в месте соединения стержней (рис. 6). Этот прибор можно рассматривать как видоизменение предыдущего прибора.

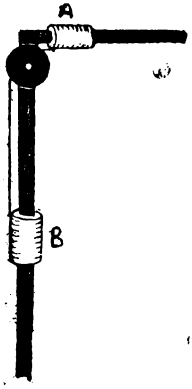


Рис. 6

После объяснения учащимся устройства прибора учитель выясняет силы, действующие на грузы А и В при неподвижном состоянии прибора и переходит к объяснению его действия.

Вращаем прибор медленно, груз А не отходит от оси прибора.

— Почему груз А не удаляется от оси обращения?

— Груз А не удаляется от оси потому, что реальная центростремительная сила $F_{ц.с}$ — вес Р груза В не только

равна, но возможно, и больше необходимой центростремительной силы $P \geqslant m\omega^2 R$.

Увеличиваем скорость оборотов, и груз А начинает удаляться от оси прибора.

— Почему груз А удаляется от оси прибора?

— Груз А удаляется от оси прибора потому, что при возросшей угловой скорости реальная центростремительная сила — вес Р груза В становится меньше необходимой центростремительной силы, т. е. $P < m\omega^2 R$. Обращаем внимание учащихся на то, что груз А при этом движется по раскручивающейся спирали.

Добиваемся, чтоб груз А, обращаясь вокруг оси, находился, примерно, посредине стержня.

— Груз А движется по окружности, что можно сказать в этом случае про реальную и необходимую центростремительные силы?

— Если груз А движется по окружности, то реальная центростремительная сила равна необходимой центростремительной силе $P = m\omega^2 R$.

Уменьшаем скорость оборотов.

— Груз А приближается к оси прибора. Сравните реальную и необходимую центростремительные силы в этом случае?

— В этом случае реальная центростремительная сила больше необходимой центростремительной силы, т. е. $P > m\omega^2 R$, и груз А, передвигаясь к оси, перемещается по скручивающейся спирали.

Гибкие обручи

Как и во всех предыдущих примерах, при изучении действия гибких обручей ставим перед учащимися две цели: научиться объяснять (определять) причину наблюдаемого явления и научиться определять действующие в приборе силы.

Учитель объясняет учащимся устройство прибора, демонстрирует его действие и начинает беседу (демонстрация по мере надобности повторяется и во время беседы).

Одинакова ли инерция движения всех частиц каждого обруча?

— Инерция движения частиц обращающегося тела, как уже известно, зависит от их массы и радиуса обращения. В гибких сбручах средние частицы имеют наи-

больший радиус обращения, следовательно, и инерция движения этих частиц наибольшая.

— Что является причиной сжатия обручей вдоль оси прибора во время их кругового движения?

— Причиной сжатия обращающихся обручей является наибольшее удаление по инерции (следовательно, по направлению касательных к круговым траекториям) средних, экваториальных частей обручей, обладающих наибольшей инерцией движения.

— Что удерживает обручи в их круговом движении?

— Обручи удерживают на круговых траекториях силы молекулярного сцепления их частиц и силы упругости, возникающие при изменении формы обручей. Сила упругости оказывается наибольшей там, где сильнее деформирован обруч, то есть, в области его середины. Стремясь восстановить прежнюю форму обруча, она (сила упругости) оказывается направленной к оси его обращения (для отдельных частиц к центру их обращения) и потому является центростремительной.

— Где имеет место центробежная сила при обращении гибких обручей вокруг оси прибора?

— Во время кругового движения обручи (наиболее сильно их средние части) по инерции удаляются от оси обращения в направлении касательных, при этом они деформируются и тянут за собой ось (связь), с которой скреплены (вверху подвижно). Если бы обручи были расположены относительно оси несимметрично, то они могли бы ее сгибать в свою сторону. Сила тяги обручей, приложенная к оси, и является центробежной силой.

В заключение можно сообщить учащимся, что примерно подобная же картина наблюдалась и в далеком прошлом при вращении вокруг оси тогда еще сильно разогретого земного шара, что привело к его сплюснутости у полюсов.

Груз, вращающийся в вертикальной плоскости

Для лучшего понимания учащимися кругового движения тела в вертикальной плоскости необходимо предварительно вспомнить с ними некоторые положения механики.

— Если движущееся прямолинейно тело находится

под действием нескольких сил, то какая сила определяет направление и ускорение его движения?

— Направление и ускорение движения прямолинейно движущегося тела, находящегося под действием нескольких сил, определяется равнодействующей всех приложенных к телу сил.

— Как направлена эта равнодействующая?

— Направление равнодействующей сил, приложенных к прямолинейно движущемуся телу, совпадает с направлением движения тела.

— Если на тело, движущееся по окружности, действует несколько сил, то какая сила определяет направление и ускорение его движения?

— Если тело движется по круговому пути, находясь под действием нескольких сил, то направление и ускорение его движения тоже определяется равнодействующей приложенных к телу сил.

— Куда бывает направлена равнодействующая сил, приложенных к телу, движущемуся по окружности?

— Равнодействующая всех сил, приложенных к телу, движущемуся по окружности, всегда направлена к центру окружности и является центростремительной силой.

После разбора этих положений показываем учащимся груз, привязанный к шнуру, свободный конец которого держим в руке.

— Какие силы действуют на висящий груз?

— На висящий груз действуют взаимно уравновешивающиеся сила тяжести и сила тяги шнура.

Движением руки сообщаем грузу толчок в сторону и вверх и приводим его в круговое движение в вертикальной плоскости. Обращаем внимание учащихся на следующее:

1. Грузик приведен в движение толчком руки.

2. Для поддержания вращательного движения толчки должны все время повторяться, из-за чего рука, держащая шнур, описывает маленькую окружность.

3. Для упрощения дальнейших рассуждений будем считать, что рука, удерживающая шнур, всегда находится в центре большой окружности.

— Какие силы действуют на обращающийся грузик в нижнем вертикальном положении траектории, в точке А (рис. 7)?

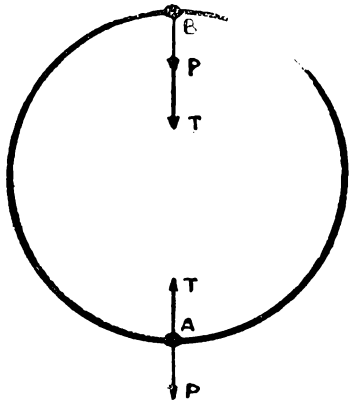


Рис. 7

— В нижнем положении круговой траектории груза на него действуют противоположно направленные сила тяжести P и сила тяги шнура T.

— Чему равна центростремительная сила, действующая на движущийся грузик в точке A?

Центростремительная сила для положения груза в точке A равна разности сил тяги шнура и веса груза:

$$F = T - P.$$

Здесь следует обратить внимание учащихся на то, что центростремительная сила как равнодействующая двух сил, направленных по одной прямой, направлена в сторону большей силы. Следовательно, сила тяги шнура — большая сила по сравнению с весом груза.

— Чему равна центростремительная сила, действующая на груз в верхнем вертикальном положении, в точке B?

— В точке B круговой траектории на грузик действуют силы, направленные в одну сторону: это сила тяжести P и сила тяги шнура T. Следовательно, центростремительная сила для этого положения груза равна их сумме: $F=T+P$.

— Почему грузик, находясь в точке B, не падает вертикально вниз под действием приложенных к нему в этом направлении сил?

— Грузик не падает вертикально вниз потому, что он по инерции от толчков, сообщаемых рукой, стремится двигаться по касательной к траектории, что мы и наблюдаем в случае разрыва шнура.

— Что можно сказать про силу натяжения шнура, удерживающего груз в точках A и B?

— Из формул центростремительной силы, мы видим, что для точки A сила натяжения шнура равна $T=P+F$, то есть сила натяжения шнура в нижней части траектории больше веса груза на величину центростремительной

силы. Для точки В сила тяги шнура равна T=F—P, то есть сила натяжения шнура в верхней части траектории меньше центростремительной силы на величину тяжести удерживаемого груза.

— Что можно сказать про центробежные силы, соответствующие положениям груза в точках А и В?

— Центробежная сила при всех положениях груза равна центростремительной, создается она действием груза на шнур и через него передается удерживающей груз руке.

В заключение учащимся следует указать, что при определении величины центростремительной силы в других точках круговой траектории необходимо принимать во внимание величины углов между направлениями сил тяжести и тяги шнура.

Конический маятник

Существует много примеров, когда центростремительной силой является равнодействующая нескольких сил, направленных под углом друг к другу. Начинать знакомить учащихся с подобными примерами целесообразно с конического маятника.

Маятник неподвижен. Учитель спрашивает учащихся:

— Какие силы действуют на неподвижный груз маятника?

— На неподвижный груз маятника действуют взаимно уравновешивающиеся сила тяжести и сила тяги шнура.

Приводим маятник в движение и продолжаем беседу:

— По какой причине маятник приходит в движение и удаляется от положения равновесия?

— Маятник приводится в движение толчком руки через шнур. От полученного толчка маятник движется по инерции. Чтобы движение маятника не было затухающим, рука периодически повторяет толчок и при этом описывает небольшие окружности. Причиной удаления маятника от положения равновесия является его движение по инерции.

— Какие силы действуют на груз маятника при установившемся круговом движении?

— При круговом движении на груз маятника действуют сила тяжести груза и сила тяги шнура, к которому груз привязан.

— Может ли какая-либо из этих сил выполнять роль центростремительной силы?

— Ни сила тяжести, ни сила тяги шнура не могут быть центростремительными силами, так как они не направлены к центру.

— Как по отношению друг к другу направлены действующие на маятник силы?

— Действующие на маятник силы тяжести и тяги шнура относительно друг друга направлены под некоторым углом.

— Куда направлена равнодействующая этих сил?

— Равнодействующая сил, действующих на маятник, очевидно, направлена к центру обращения маятника.

— Что является центростремительной силой, действующей на груз маятника?

— Центростремительной силой, действующей на груз маятника, является равнодействующая приложенных к нему сил тяжести и тяги шнура.

После этого учитель выполняет на доске, а учащиеся в тетрадях чертеж сложения сил, действующих на маятник (рис. 8 без верхней части).

Когда на последних уроках изучения темы пойдет речь о центробежной силе, этот чертеж повторяется уже с верхней частью и сопровождается, примерно, следующей беседой:

— Что является связью для обращающегося груза маятника?

— Связью для него является шнур, к которому он привязан, и удерживающая шнур рука.

— Если силу тяги шнура, приложенную к маятнику, признать действующей силой, то, согласно третьему закону механики, какую силу следует считать противодействующей?

— Противодействующей силой следует считать силу натяжения шнура со стороны груза.

— Куда через шнур передается сила его натяжения?

— Сила натяжения шнура передается руке, удерживающей маятник.

— Как действует сила тяги шнура на руку?

— Сила тяги шнура частично тянет руку в сторону, а частично — вертикально вниз.

Учитель поясняет учащимся этот вывод с помощью чертежа на классной доске (рис. 8), который учащиеся зарисовывают в тетрадях.

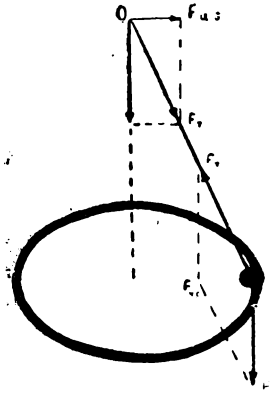


Рис. 8

— Где в этом случае проявляется центробежная сила?

— Центробежной силой, приложенной к руке, удерживающей маятник, является горизонтальная составляющая силы тяги шнура. По величине она равна центростремительной силе, но направлена она в противоположную сторону.

В заключение учителю следует обратить внимание учащихся на то, что центростремительная и центробежная силы в разобранном случае взаимно равны, но направлены не по одной прямой, а по параллельным прямым, что часто наблюдается в различных сложных установках и механизмах.

Маятники на горизонтальном диске

Два маятика различной массы укреплены на горизонтальном диске на равных расстояниях от оси вращения диска.

Через колесо вращательной машины учитель сообщает отдельные толчки маятникам и обращается к учащимся с вопросом:

— Я сообщаю маятникам отдельные толчки, как от этого изменяется их положение?

— От каждого толчка маятники по инерции несколько отходят от положения равновесия.

Приводим диск с маятниками во вращательное движение.

— Радиусы обращения маятников одинаковые, массы их разные. Что можно сказать о величине отклонения маятников от положения их равновесия?

— При одинаковой угловой скорости маятник большей массы отклоняется на больший угол, по сравнению

с маятником меньшей массы, так как инерция обращающегося тела зависит от его массы и радиуса обращения.

— Как зависит угол отклонения маятников от угловой скорости их обращения?

— При увеличении угловой скорости вращения прибора угол отклонения маятников от положения их равновесия резко увеличивается.

— Что можно сказать, на основании просмотренного опыта, о зависимости центростремительной силы от массы обращающегося тела, его угловой скорости и радиуса обращения?

— Чем больше масса обращающегося тела и чем больше его угловая скорость и радиус, тем на большее расстояние он удаляется по инерции от оси обращения и тем большей должна быть центростремительная сила, удерживающая его на круговом пути.

— Какая формула выражает эту зависимость?

$$F_{ц.с.} = m\omega^2 R.$$

Аналогичную демонстрацию можно провести и с маятниками равной массы, расположенными на различных расстояниях от оси вращения диска.

Регулятор Уатта

Усвоив материал, относящийся к коническому маятнику, учащиеся без затруднения разберутся в действии регулятора Уатта, рассматривая его как видоизменение конического маятника.

Во время демонстрации его действия учителю необходимо сосредоточить внимание учащихся на причине удаления шаров регулятора от оси (инерция движения), на определении центростремительной силы (равнодействующая сил тяжести шара и тяги стержня) и позднее на определении центробежной силы (горизонтальная составляющая силы тяги шара, приложенная к оси регулятора в месте соединения его со стержнем).

Дополнительные замечания

С помощью вращательной машины осуществляются и другие различные демонстрации, но так как они в обязательный курс физики средней школы не входят, то

здесь нет нужды разбирать их подробно. Достаточно упомянуть, что и в них существенная роль принадлежит инерции движения. Рассмотрим кратко некоторые примеры:

Катящаяся цепочка. Цепочка, слетев с вращающегося диска (шкива), некоторое время катится по столу (или полу), сохраняя форму кольца. Причина этого явления не в том, что на звенья цепочки действует центробежная сила, а в том, что каждое звено по инерции стремится двигаться по касательной к траектории своего движения, что и поддерживает натяжение цепочки в форме кольца.

Понятия центростремительной и центробежной сил к катящейся цепочке в целом не применимы, так как здесь нет обращения, а есть вращение вокруг собственной оси. Здесь, как и в других аналогичных примерах (вращающийся точильный камень и т. п.), можно говорить о центростремительной и центробежной силах, лишь имея в виду их действие на отдельные частицы этих тел.

Стержень со шнуром к вращательной машине. Прямолинейный стержень (или металлическая цепочка), подвешенный через шнур к крючку вращательной машины во время ее вращения, принимает горизонтальное положение. Причина этого явления также в движении по инерции. Удаляясь по инерции на возможно большее расстояние от оси обращения, стержень располагается в горизонтальной плоскости. Здесь особенно сказывается зависимость инерции каждой части стержня от радиуса ее обращения.

Модель маятника Фуко. Маятник сохраняет плоскость своего качания только вследствие инерции. Будучи выведенным из положения равновесия, он оказывается под действием только силы тяжести, направленной вертикально. Эта сила не может повернуть плоскость качания маятника.

В движении же по инерции нет действующей силы, а потому и нет причины для изменения плоскости его качания.

Вращательный («центробежный») насос. В этом насосе вращающиеся лопасти ротора отбрасывают воду к периферии барабана, куда вода летит по инерции и создает соответствующий напор. Основную роль в работе этих насосов выполняет инерция движущейся воды. Центробежная сила в работе вращательных насосов проявв-

ляется в силе давления воды на стенки барабана. Сила давления стенок барабана на воду осуществляет центростремительную силу.

Вращательное («центробежное») литье. Во время вращения прибора жидкий металл заполняет нужную форму только в силу инерции. Подобно тому, как в сосуде с разнородными жидкостями ртуть по инерции занимает экваториальную зону шара, так и частицы металла при вращательном литье по инерции удаляются от оси вращения прибора и затвердевают в его периферийных частях. Таким образом, в этом процессе основная роль принадлежит инерции. Центробежная сила здесь проявляется лишь в давлении жидкого металла на стенки сосуда (формы).

О. Н. МУРАДОВА

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРОВ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ФИЗИКИ

В настоящее время в школьном курсе физики вопрос о спектрах рассматривается как продолжение темы «Дисперсия». Непосредственно после изучения дисперсии изучаются спектры испускания и поглощения, устройство спектроскопа, дается понятие о спектральном анализе. Причем все эти вопросы излагаются схематично, без всякого физического обоснования. Объяснить же происхождение линейчатого спектра и обосновать возможность спектрального анализа можно только, рассматривая процессы излучения в тесной связи со строением атома.

По школьной программе (6) строение атома изучается после оптики. В связи с этим вопрос о спектрах излагается в школе в значительной степени формально, что, безусловно, снижает качество знаний учащихся. Чтобы избежать этого, следует излагать вопрос о спектрах позднее, при изучении строения атома, в тесной связи с этой темой.

Эта идея не новая, она высказана в работах Рубинштейна (1, 2), но предлагаемая им методика связана с коренной перестройкой программы, что трудно осуществить на базе старого учебника, который имеется сейчас в распоряжении учителей и учащихся.

В настоящей работе предлагается изменить место изучения вопроса о спектрах в школьном курсе физики. При изучении волновой оптики следует давать только понятие о дисперсии как о разложении света по длинам волн вследствие различия показателя преломления стек-

ла призмы для разных длин волн. При изложении этой темы следует ограничиться демонстрацией сплошного спектра. Далее в учебнике А. В. Перышкина дается изложение вопросов о типах спектров, спектральном анализе и т. д. (7). Целесообразно перенести изучение указанных вопросов на более позднее время, излагая их при изучении процессов испускания и поглощения энергии атомом. Такая перестановка материала вполне допустима и легко осуществима в каждой школе. Это позволяет добиться более глубоких и осознанных, а следовательно, и более прочных знаний учащихся.

После демонстрации видимого спектра учитель сразу переходит к изложению вопроса «Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение». Простые демонстрации по этой теме описаны в работе (3). Далее изложение материала проводится в соответствии с учебником А. В. Перышкина (7).

К вопросу «Спектры» учитель должен перейти после изучения планетарной модели строения атома Резефорда. Учащимся сообщается, что в развитии теории строения атома очень важную роль сыграло изучение процессов испускания и поглощения атомами электромагнитных волн. Учащиеся к этому времени уже знают, что свет испускается атомами вещества. Следовательно, изучая свойства света, можно проникнуть в тайну строения атома. Учитель должен показать учащимся, что, применяя законы классической электродинамики к процессам излучения атома, получают выводы, находящиеся в противоречии с опытом. По этим законам атом должен испускать непрерывный спектр, т. е. спектр, состоящий из всевозможных частот. Опыт показывает, что это не так. Демонстрируя спектры испускания газов и паров малой плотности, учитель убеждает учащихся, что они испускают дискретный спектр, т. е. спектр, состоящий из определенных для каждого элемента частот. Такие спектры в учебной и методической литературе принято называть линейчатыми, так как, изучая их при помощи спектроскопа, мы наблюдаем их в виде отдельных разноцветных узких линий, разделенных темными промежутками. Каждая из этих линий представляет собой изображение светящейся щели спектроскопа.

Нужно добиться, чтобы учащиеся четко отличали классификацию спектров по их внешнему виду и по про-

исхождению. По своему происхождению спектры бывают непрерывные и дискретные. Непрерывные спектры испускаются раскаленными твердыми и жидкими телами, а также газами большой плотности. У них частицы находятся на малых расстояниях друг от друга и сильно взаимодействуют между собой. В парах и газах малой плотности, испускающих дискретный спектр, атомы находятся на больших расстояниях друг от друга. Поэтому их взаимодействием можно пренебречь и считать, что газ излучает как совокупность отдельных атомов.

Внешний вид спектра определяется только конструкцией коллиматора спектрального прибора. Если вместо щели поставить в спектроскопе, например, небольшое круглое отверстие, то мы получим спектр того же источника в виде маленьких кружочков (рис. 1).

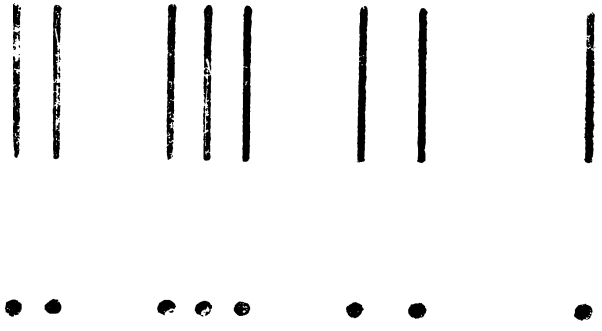


Рис. 1

На практике понятие линейчатого спектра отождествляется с понятием дискретного спектра, что вызывает ошибочные представления у учащихся. Чтобы этого не случилось, объясняя устройство и принцип действия спектроскопа, надо обязательно контролировать, насколько правильно и глубоко понята учащимися роль узкой щели спектроскопа. Для этого достаточно поставить перед ними ряд контрольных вопросов.

Как изменится вид спектра, который наблюдался в виде линий, если щель спектроскопа заменить: а) маленьким круглым отверстием, б) квадратным отверстием? Ответ: вместо линий спектр будет состоять: а) из кружочков, б) из квадратиков.

Как изменить вид спектра, если увеличить ширину щели? Ответ: спектр будет состоять из отдельных широких полос, разделенных темными промежутками.

Как изменится вид спектра, если убрать щель? Ответ: спектр будет сплошным.

Полученные ответы желательно проверить опытным путем.

После классификации спектров учитель переходит к изложению постулатов Бора и объяснению процессов излучения и поглощения энергии атомом с точки зрения квантовой теории. Из теории Бора следует, что испускаемая частота ν определяется только разностью энергий стационарных состояний атома. $h\nu = E_2 - E_1$. По испускаемым частотам можно судить о том, какие энергетические состояния могут быть у атома. Теперь учащимся необходимо объяснить тот факт, что каждый элемент имеет характерный спектр. Атомы различных элементов обладают различным набором энергетических состояний, поэтому различны испускаемые ими частоты.

Следовательно, причиной дискретности спектра атомов является то, что энергия атома может иметь не любые значения, а дискретный ряд значений. Существование дискретных энергетических состояний атомов является важной их особенностью, оно доказано многими опытами. Например, опыты Франка и Герца по возбуждению атомов ртути электронными ударами. На занятиях кружка можно познакомить учащихся с этими опытами (2). Учителю следует подчеркнуть, что теория Бора удовлетворительно объясняет происхождение спектров только водорода и водородоподобных атомов. С увеличением числа электронов в атоме спектр закономерно усложняется, но каково бы ни было число электронов в атоме, механизм излучения атомом остается тем же, что и в простых атомах.

На занятиях кружка учитель может дать следующее объяснение происхождения сплошного спектра от раскаленных твердых и жидких тел с точки зрения строения атома.

Вследствие сильного взаимодействия между частицами тела характер энергетических состояний его атомов меняется. Вместо дискретного ряда значений энергии возможных состояний, наблюдаются любые энергетические состояния. Поэтому здесь возможно бесконечно

большое число возбужденных состояний атомов. При возвращении атомов в нормальное состояние излучается спектр, содержащий частоты, соответствующие всевозможным энергетическим переходам, т. е. непрерывный спектр. Он не зависит от природы тела, так как атомы здесь уже не имеют характерных для каждого элемента энергетических состояний.

На внеклассных занятиях можно также обратить внимание учащихся на то, что линейчатые спектры газов и паров малой плотности сопровождаются слабым сплошным фоном (4).

Следовательно, кроме дискретного спектра, атомы газов и паров излучают непрерывный спектр. Как объяснить его происхождение? Нужно напомнить учащимся, что для возбуждения атома необходимо сообщить ему энергию. Чем больше энергии поглощает атом, тем на более удаленную орбиту переходит в нем электрон. При получении некоторой, вполне определенной для каждого атома энергии, электрон может выйти за пределы атома, стать свободным электроном, потеряв всякую связь с атомом. Атом, потерявший электрон, становится положительно заряженным ионом. Этот процесс называется ионизацией. Энергия, которую необходимо сообщить атому, чтобы ионизировать его, называется энергией ионизации E_i. Если подводить к атому энергию $E_1 > E_i$, то излишек энергии $E_1 - E_i$ идет на сообщение вылетевшему из атома электрону кинетической энергии.

$$E_i = E_i + \frac{mv^2}{2},$$

где m и v — соответственно масса и скорость электрона.

При обратном процессе захвата электрона ионом происходит выделение полученной энергии в виде кванта света, энергия которого равна.

$$h\nu = E_i + \frac{mv^2}{2}.$$

Так как скорость свободного электрона может быть любой, то такие переходы не квантуются. Поэтому захват свободных электронов ионами сопровождается излучением непрерывного слабого спектра.

Переходя к изложению вопроса о спектрах поглощения, учитель должен продемонстрировать учащимся линейчатый спектр поглощения паров натрия (3,5). При этом обращается внимание на тот факт, что темная линия поглощения паров натрия появляется на том же самом месте, где находилась его желтая линия излучения.

Следовательно, спектры поглощения атомов соответствуют их спектрам испускания (закон Кирхгофа). Таким образом, спектры поглощения также характерны для разного рода атомов, как и их спектры испускания.

Это тоже легко объяснить с точки зрения теории Бора. При облучении атома светом от какого либо источника атом переходит из нормального состояния в возбужденное, при этом он поглощает количество энергии $\triangle E$, равное разности энергий атома E_2 и E_1 в возбужденном и нормальном состояниях;

$$\triangle E = E_2 - E_1.$$

Таким образом, из всего спектра света, падающего на атом, поглощается только частота ν, соответствующая поглощенному количеству энергии $\nu = \frac{\Delta E}{h}$.

Именно эту частоту ν способен излучать атом при возвращении в нормальное состояние, так как при этом излучается такое же количество энергии $\triangle E$, которое было поглощено при его возбуждении.

Затем учитель дает понятие о спектральном анализе как методе исследования химического состава вещества путем изучения его спектров испускания или поглощения. Здесь учитель имеет очень ценный материал, так как спектральный анализ получил чрезвычайно широкое применение в промышленности и науке. Спектры всех известных элементов в настоящее время хорошо изучены и занесены в специальные справочники и таблицы. Пользуясь ими, специалист быстро может «расшифровать» любой спектр, т. е. узнать, из каких элементов состоит изучаемое вещество.

По интенсивности линий в спектре судят о количестве данного элемента в веществе. Спектральные лаборатории имеются сейчас на каждом заводе, так как совре-

менное производство предъявляет очень высокие требования к качеству используемых материалов, а свойства сплавов зависят от их состава, от процентного содержания тех или иных примесей. Желательно организовать экскурсию учащихся в спектральную лабораторию ближайшего завода. В г. Ульяновске можно организовать экскурсии в спектральные лаборатории автозавода и Ульяновского педагогического института.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубинштейн Д. Х. Система изучения физической оптики в средней школе, Докл. АПН РСФСР, вып. 6, 1962.

2. Рубинштейн Д. Х. Изучение в средней школе изменения энергии атома, Докл. АПН РСФСР, вып. 5, 1962.

3. Огородников Ю. Ф. Опыты по спектроскопии. «Физика в школе», № 5, 1962.

4. Глухов Н. Д. О механизме образования непрерывного спектра газов, «Физика в школе», 1963, № 3.

5. Перкальскис Б. Ш. Демонстрация линейчатого спектра поглощения, «Физика в школе», 1961, № 5.

6. Программы средней школы на 1969/70 учебный год. Физика. Астрономия. Изд-во «Просвещение», М., 1969.

7. Перышкин А. В. Курс физики, ч. 3. Учпедгиз, 1968.

Е. Г. КАЛАШНИКОВ

К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМЫ «ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ»

Проект новой школьной программы по физике предусматривает ознакомление учащихся с вопросами физических основ использования ядерной энергии. Здесь мы приводим необходимый учителю материал и методические рекомендации по разделам темы: цепная реакция деления; освобождение ядерной энергии при делении ядер; критическая масса; коэффициент размножения нейтронов; замедление и поглощение нейтронов; ядерный реактор. При изложении мы будем следовать скорее логике предмета, чем порядку, принятому в программе. Имеется в виду, что к началу изучения этой темы вопросы школьной программы, раскрывающие физику процессов деления и природу внутриядерной энергии, должны быть учащимся известны. До введения новой программы, материал можно использовать на факультативных занятиях.

Деление U^{235} под действием нейтронов

Процессы, происходящие в ядерных реакторах, удобно начать рассматривать на примере сферы из делящегося изотопа урана. Пусть в такую сферу попадают нейтроны (например, от внешнего источника нейтронов).

В уране будут идти параллельно реакции двух типов: $U^{235} + n_0 \rightarrow 2$ осколка деления $+ \nu$ нейтронов $+$ $+$ β-частицы $+$ γ-кванты $+$ антинейтрино $+$ энергия (1-а);

$U^{235} + n_0 \rightarrow U^{236} + \gamma$-кванты (1-б)

Выражение (1-а) просто означает, что ядро U^{235} может, поглощая нейтрон, разделиться на два осколка с

испусканием нескольких нейтронов, β-частиц, γ-квантов и антинейтрино. Часть нейтронов, β-частицы и часть γ-квантов испускаются не в момент деления, а с некоторым запаздыванием. Это связано с тем, что ядра элементов, на которые распадается ядро урана, возникают в возбужденном состоянии и несколько перегружены нейтронами (ведь в уране доля нейтронов от общего числа нуклонов в ядре ~0.61, а в середине таблицы Менделеева, например, у ядра ксенона ~ 0,59). Путем β-распада, с испусканием γ-квантов и антинейтрино, они переходят в устойчивое состояние.

Может случиться, что и после β-распада ядро осколка обладает еще значительной энергией возбуждения (больше энергии связи нейтрона), тогда может наблюдаться еще один процесс—испускание нейтрона возбужденным дочерним ядром.

Время испускания таких запаздывающих нейтронов определяется периодом полураспада соответствующего перехода. Реакция деления идет с выделением энергии в среднем 200 мэв на каждое деление. Учащимся надо напомнить, что средняя энергия связи на нуклон у тяжелых элементов ~7,5 Мэв/нуклон, а у элементов середины таблицы Менделеева (к которым относятся осколки деления) ~8,4 мэв/нуклон. Тогда разница, умноженная на число нуклонов в ядре урана и дает число порядка 200 мэв

Распределение этой энергии в Мэв такое:

Кинетическая энергия осколков деления	— 167
мгновенных γ-квантов	— 5
нейтронов деления	— 5
β-частиц распада,	— 6
γ-квантов распада	— 6
антинейтрино	— 11
ИТОГО:	— 200 Мэв

Выражение (1-б) описывает процесс радиационного захвата нейтронов с образованием нового изотопа урана — U^{236}. В результате этой реакции часть нейтронов безвозвратно теряется.

Отношение числа реакций захвата (1-б) к числу реакций деления (1-а) —α для данного изотопа урана зависит только от энергии нейтронов. Ядра, которые могут взаимодействовать с нейтронами по схеме (1-а) даже

при очень низких энергиях нейтронов, называются делящимися. Это U^{235}, U^{233} и Pu^{239}.

Доля нейтронов, участвующих в реакции деления, равна:

$$\frac{\text{число делений}}{\text{число делений} + \text{число захватов}} = \frac{1}{1+\alpha}$$

Если при каждом делении возникает ν-нейтронов, то в среднем при каждом поглощении возникает $\eta = \nu\frac{1}{1+\alpha}$ нейтронов. Величина η является очень важной характеристикой в теории реакторов. Обычно $2{,}5 < \nu < 3{,}0$, а $1{,}75 < \eta < 3{,}0$.

Таким образом, в таком простейшем реакторе на каждый поглощенный нейтрон появляются в среднем

$$U^{235} + n_0 \rightarrow \frac{2}{1+\alpha} \text{ осколков деления} + \frac{\alpha}{1+\alpha} U^{236} +$$

$$+ \nu\frac{1}{1+\alpha} \text{ нейтронов} + \beta\text{-частицы} + \gamma\text{-кванты} —$$

$$+ \text{антинейтрино} + \text{энергия}. \qquad (1\text{-в})$$

Цепная реакция. Эффективный коэффициент размножения

Если бы сфера из U^{235} имела бесконечно большой радиус, так что практически все нейтроны оставались бы внутри сферы, то, имея в первом поколении N_1 нейтронов согласно (1-в) во втором поколении мы имели бы $N_2 = N_1\frac{\nu}{1+\alpha} = \eta N_1$ нейтронов, в третьем $N_3 = \eta N_2 = \eta^2 N_1$ и т. д., так как $\eta > 1$, то $N_3 > N_2 > N_1$ — с каждым поколением нейтронов становилось бы в η раз больше — шла бы расширяющаяся цепная реакция. В этом случае никакого внешнего источника нейтронов не требуется.

Любая реальная сфера имеет конечный радиус. Часть нейтронов может пересекать поверхность и покидать реактор, причем, чем меньше сфера, тем больше утечка,

так как отношение поверхности к объему в сфере обратно пропорционально радиусу.

Цепная реакция будет самоподдерживающейся, если из $\frac{\nu}{1+\alpha}$ нейтронов, возникающих при каждом делении, по крайней мере один будет в свою очередь поглощен с делением.

Таким образом, будет ли реакция самоподдерживающейся, зависит как от η (определяемом свойствами ядерного топлива), так и от размеров сферы.

Пусть доля P нейтронов остается в пределах сферы (говорят: вероятность избежать утечки равна P). Каждый акт поглощения приводит к появлению η нейтронов, из них P остается внутри сферы. Следовательно, число нейтронов будет оставаться с каждым поколением постоянным, если величина.

$$K = \eta P$$

будет равна 1. Эта величина называется эффективным коэффициентом размножения. Если $K > 1$, число нейтронов будет увеличиваться с каждым поколением. В этом случае говорят, что реактор надкритичен. Если $K < 1$, число нейтронов (а значит и число случаев деления) уменьшается—реактор подкритичен. Если $K=1$, число нейтронов в каждом поколении остается постоянным—реактор находится в критическом состоянии.

Управление реактором заключается в поддержании $K = 1$. Обычно это достигается введением или извлечением специальных поглощающих стержней. Материалом для таких регулирующих стержней служат вещества, сильно поглощающие нейтроны, например, бор или кадмий.

Критическая масса

Объем сферы, в котором $k = 1$, называется критическим, а масса такой сферы — критической массой. В таблице 1 приведены критмассы для металлических сфер U^{253} (93,9% обогащения), U^{233} (98% обогащения) и Pu^{239} (δ — фаза, $d = 15{,}8$ г/см^3).

Таблица 1

Делящийся изотоп	U^{235}	U^{233}	Pu^{239}
Критмасса сферы, кг	48,8	15,8	16,45

Ясно, что реактор всякой другой формы будет иметь большую критмассу, так как отношение поверхности к объему для всякой другой объемной фигуры (при данной массе) больше, чем для сферы, и, следовательно, утечка нейтронов также больше.

Роль отражателей

Величину утечки можно уменьшить, окружая сферу отражателем—веществом, хорошо рассеивающим, но слабо поглощающим нейтроны. Тогда часть нейтронов утечки, после многократных столкновений с ядрами отражателя, будет снова попадать в реактор. Отражателем может служить слой тяжелой воды, воды, графита, бериллия или природного урана.

В таблице 2 приведены критмассы металлических сфер из тех же веществ, что и в таблице 1, но окруженных водным отражателем.

Таблица 2

Делящийся изотоп	U^{235}	U^{233}	Pu^{239}
Сфера, окруженная толстым слоем воды, кг	22,8	7,5	7,6

Та часть реактора, которая содержит делящийся материал, называется активной зоной.

Роль замедлителей

Описанный выше реактор является реактором на быстрых нейтронах. В таком реакторе большая часть делений происходит под действием нейтронов высоких энергий, поскольку нейтроны деления (а они рождаются с

энергией в среднем 2 Мэв) при первом же столкновении с ядрами урана поглощаются.

Вероятность взаимодействия нейтрона с ядром урана растет обратно пропорционально скорости нейтронов. Так, при уменьшении энергии нейтрона от 2 Мэв до 0,025 эв вероятность вызвать деление (говорят: сечение деления) увеличивается в 500 раз.

Упрощенно это можно объяснить так: чем медленнее нейтрон, тем дольше он находится вблизи ядра, тем больше вероятность того, что он не проскочит мимо.

Более строгое объяснение заключается в двойственной природе нейтрона. Чем меньше скорость нейтрона, тем больше его длина волны де-Бройля, тем большая область попадает в сферу влияния такого нейтрона. Конечно, вероятность быть поглощенным без деления также растет с уменьшением скорости нейтрона, но величина α меняется не сильно—от 0,10 при энергии нейтрона 2 Мэв до 0.18 при энергии 0,025 эв.

Таким образом, если каким-то способом в реакторе уменьшить скорость нейтронов, то в единице объема активной зоны можно иметь гораздо меньше ядер урана, чем в активной зоне быстрого реактора. Значит, дальнейшего уменьшения критмассы можно достигнуть, замедляя нейтроны до того, как они столкнуться с ядрами делящегося изотопа. Это достигается размешиванием делящегося вещества с хорошим замедлителем. «Хорошим» замедлителем считается вещество с малым атомным весом (тогда, по закону соударяющихся шаров, нейтрон при нескольких соударениях может потерять значительную долю своей энергии) и малой поглощательной способностью.

Это тяжелая вода, вода, графит, бериллий и некоторые другие вещества. Варьируя размеры сферы и концентрацию урана в замедлителе, можно подобрать условия, когда критмасса будет минимальна.

В таблице 3 приведены минимальные критмассы водных растворов солей U^{235}, U^{233} и Pu^{239}.

Таблица 3

Делящийся изотоп	U^{235}	U^{233}	Pu^{239}
Сфера водного раствора с водным отражателем, кг.	0,820	0,590	0,510

Очевидно, нейтроны могут замедляться только до «тепловых» энергий, т. е. до энергий теплового движения атомов ($E = 0{,}025$ эв), после чего они будут с равной вероятностью и терять и получать энергию при столкновениях с ядрами замедлителя. Реактор, в котором большая часть делений производится такими замедленными нейтронами, называют реактором на тепловых нейтронах или просто тепловым.

Реакторы, в которых замедлитель и делящееся вещество размешаны равномерно, называются гомогенными.

Итак, все понятия, требуемые программой в той части, которая относится собственно к физическим основам использования ядерной энергии, введены. Если учитель располагает еще одним или двумя часами, то будет полезно рассмотреть вопрос о гетерогенных реакторах, поскольку именно такого типа реакторы используются практически на всех атомных электростанциях, а также вопрос об управлении ядерными реакторами.

Реакторы на природном уране

Выше рассматривались реакторы, активная зона которых содержит чистые делящиеся изотопы. Но такие материалы чрезвычайно дороги. Нельзя ли использовать природный уран? В природном уране содержится 1/140 часть U^{235}, остальное — U^{238}, который делится только очень быстрыми нейтронами ($E \geqslant 1{,}2$ Мэв) и не делится тепловыми, но зато энергично поглощает без деления, особенно в так называемой резонансной области ($5\text{эв} < E < 200$ эв).

В реакторе на природном уране будут конкурировать четыре процесса:

а) поглощение быстрых нейтронов выше порога деления U^{238} (с $E \geqslant 1{,}2$ Мэв);

б) захват нейтронов без деления на резонансах U^{238} в процессе замедления;

в) радиационный захват медленных (тепловых) нейтронов в замедлителе и примесях;

д) захват тепловых ($E \sim 0{,}025$ эв) нейтронов в уране с последующим делением и без деления.

В природном уране появляется $\eta = 1{,}34$ быстрых нейтронов на 1 захваченный тепловой нейтрон. Некоторое число нейтронов возникает при делении U^{238} быстрыми

нейтронами. Обычно этот эффект увеличивает количество нейтронов на несколько десятых процента. Это учитывается введением множителя ε. Таким образом, возникает $\eta\varepsilon$ быстрых нейтронов на 1 поглощенный нейтрон. Сталкиваясь с ядрами замедлителя, они будут терять скорость и достигнут резонансной области энергий. Часть из них будет поглощена ядрами U^{238}, а доля P избежит резонансного поглощения и будет замедляться до тепловой энергии. В процессе замедления и последующей диффузии часть нейтронов покинет реактор, а доля P избежит утечки. Таким образом, на 1 поглощенный в уране нейтрон, тепловой области энергий достигнут $\eta\varepsilon pP$ нейтронов. Из них доля f поглотится в U^{235}, а остальные в примесях и замедлителе. f называют коэффициентом использования тепловых нейтронов. Тогда $K = \eta\varepsilon pfP$.

Оказалось, что гомогенный реактор на естественном уране возможен только с замедлителем на тяжелой воде. Критпараметры такого реактора приведены в таблице 4.

Таблица 4

Концентрация соли г/см³	Критический радиус, см	Масса, кг
0.0238	452	6602

Гетерогенные реакторы

Никакая смесь природного урана с другим замедлителем не может обеспечить $K = 1$. Так, для смеси графита и природного урана наибольший K, которого можно добиться, равен 0,85. Эту трудность можно обойти, если заставить нейтроны замедляться не в смеси замедлителя и урана, а в чистом замедлителе, а затем тепловые нейтроны использовать для деления. Это осуществляется в гетерогенном реакторе, где уран размещается в замедлителе в виде блоков.

В таком реакторе быстрые нейтроны деления легко покидают блок урана и теряют свою энергию в замедлителе и имеют больше шансов пройти резонансную область энергий, не столкнувшись с ядрами урана.

Замедлившись до тепловой энергии, нейтроны будут диффундировать в замедлителе и, в конце концов, попа-

дут в блокурана и с большой вероятностью будут поглощены ядрами U^{235}.

В гетерогенном реакторе с блоками природного урана, размещенными в графитовом замедлителе, можно получить $\eta\varepsilon p f = 1{,}08$.

Поскольку такие реакторы обычно велики по размерам, то утечка нейтронов из них мала $\left(P \geqslant \frac{1}{1{,}08}\right)$ и можно получить $K = 1$. Именно таким реактором был первый в мире реактор, запущенный Э. Ферми в 1942 году, и первый в Европе реактор, запущенный И. В. Курчатовым с сотрудниками 25 декабря 1946 г. Первый советский реактор содержал 45 т урановых блоков и около 450 т. графита.

Обычно же в реакторах применяется в разной степени обогащенный уран (с более высоким относительным содержанием U^{235}, чем в природном уране) и критмассы меньше, чем в реакторе на природном уране и больше, чем на чистом делящемся изотопе. Возможных вариантов здесь неограниченное множество. Кроме того, чтобы получить от реактора заметное количество тепла, необходимо снабдить его устройством для охлаждения. Поэтому в активной зоне всегда будут находиться конструкционные и охлаждающие материалы, присутствие которых будет влиять на коэффициент размножения нейтронов и, следовательно, на величину критмассы.

Изменение мощности реактора. Управление реактором

При каждом акте деления выделяется 200 мэв энергии. Если в единицу времени в единице объема активной зоны имеется в среднем n нейтронов, то мощность реактора пропорциональна плотности нейтронов n (чем больше нейтронов, тем больше делений) и объему реактора:

$$P \sim 200 \cdot nV.$$

Если $k = 1$, то мощность остается на одном уровне, но если $k > 1$, то число нейтронов с каждым поколением будет расти:

$$n_m = k^m \cdot n_0.$$

Здесь n_0 — плотность нейтронов в начальный момент, когда К скачком изменилось от 1 до к, а n_m — плотность нейтронов m-го поколения.

Если время жизни одного поколения l сек (среднее время от момента рождения нейтрона до момента поглощения), то m-му поколению соответствует время t=ml, а поскольку мощность реактора P (t) пропорциональна плотности нейтронов n (t), то

$$P(t) = P_0 к^{\frac{t}{l}}.$$

Прологарифмируем это уравнение:

$$\ln \frac{P(t)}{P_0} = \frac{t}{l} \ln к.$$

Поскольку к обычно мало отличается от 1, то можно написать.

$$\ln k = \ln[1 + (k - 1)] \approx k - 1.$$

После этого закон изменения мощности запишется в виде,

$$P(t) = P_0 \exp\left(\frac{k-1}{l} t\right),$$

где P_0 — мощность реактора при $t = 0$.

Если бы все нейтроны испускались при делении мгновенно, то среднее время жизни нейтронов было бы величиной порядка 10^{-4} сек. (для теплового реактора), тогда даже при $к - 1 = 0{,}0025$ мощность реактора увеличивалась бы за 1 секунду в

$$\frac{P(t)_{t=1}}{P_0} = \exp\left(\frac{0{,}0025}{0{,}0001 \text{ сек}} \cdot 1 \text{ сек}\right) = e^{25} \text{ раз!}$$

Никакое регулирование при таких скоростях изменения мощности невозможно. К счастью, не все нейтроны испускаются мгновенно. Часть нейтронов, приблизительно 0.0065, испускается с некоторым запаздыванием. Среднее время запаздывания τ_3 равно среднему времени жизни радиоактивных осколков — источников запаздывающих нейтронов—12,4 сек. Время жизни поколения нейтронов l

равно среднеарифметическому от жизни $(1 - 0.0065)\cdot k$ мгновенных и $0.0065\cdot k$ запаздывающих нейтронов:

$$\bar{l} = \frac{(1 - 0{,}0065)\, k l + 0{,}0065\, k \tau_з}{k} \approx l + 0{,}0065\, \tau_з,$$

т. е. порядка 0,08 сек. Тогда предыдущий пример будет выглядеть иначе.

$$\frac{P(t)_{t=1}}{P_0} = \exp\left(\frac{0{,}0025}{0{,}08 \text{ сек}} \cdot 1\text{сек}\right) = \sqrt[32]{e!}$$

За 1 сек. мощность изменится совсем мало и автоматическая система при достижении желаемого уровня мощности сможет ввести поглощающие стержни до уровня, когда $k=1$, и поддерживать мощность на заданном уровне.

Материал по другим разделам темы «Ядерная энергия» — о принципах устройства атомной электрической станции, успехах и перспективах ядерной энергетики в СССР, применениях радиоактивных изотопов и о дозиметрии учитель сможет найти в многочисленной литературе.

Многие из этих вопросов могут послужить темами для рефератов учащихся. Можно рекомендовать следующие литературные источники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Советская атомная наука и техника. Юбилейный сборник статей. Атомиздат, 1967.

2. Левин В. Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. Учебное пособие для техникумов. Атомиздат, 1966.

3. Глесстон С. Атом, атомное ядро и атомная энергия. ИЛ. 1960.

4. Проценко А. Н. Покорение атома. Атомиздат, 1964.

5. Воскобойник Д. И. Атомная энергетика. ГИТТЛ, 1956.

6. Миллер В. С. Атомная энергетика и ее будущее. «Наукова думка», Киев, 1967.

7. Кузин А. и Березина И. Атомная энергия в сельском хозяйстве. Атомиздат, 1966.

8. Атом для мира. (Прогресс в мирном использовании атомной энергии). Сб. статей АН СССР, 1966.

Данные о критпараметрах взяты нами из книги Дубовского В. Г. и др. «Критические параметры»... Спр. Атомиздат, 1966.

В. Ф. ЛЫСОВ

КРУЖКОВЫЕ ЗАНЯТИЯ ПО ТЕМЕ «ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

I ЗАНЯТИЕ

ТЕМА «ЭФФЕКТ ПЕЛЬТЬЕ»

План занятия

1. Объяснение и демонстрация учащимся термоэлектрического явления в металлах и полупроводниках (эффект Зеебека).
2. Демонстрация и объяснение эффекта Пельтье.

Оборудование: термопары, гальванометр, тепловой зонд, реостат, миллиамперметр, источник тока 4—6 вольт.

Содержание занятия

Повторить демонстрации возникновения термотока при нагревании места спая двух разнородных проводников и полупроводников. Обратить внимание на значительную чувствительность термопары даже к небольшому изменению температуры спаев (например, отклонение стрелки гальванометра, присоединенного к термопаре, при соприкосновении руки с одним спаем термопары).

В 1834 году французский физик Пельтье открыл другое термоэлектрическое явление, сущность которого заключается в следующем. Если через термопару, состоящую из двух спаев, пропустить ток, то один спай нагревается, а другой охлаждается. Это явление можно наблюдать и на термопаре с одним спаем. При этом при определенном направлении тока в спае выделяется тепло,

добавочное по отношению к обычному ленц-джоулеву теплу, при обратном направлении тока в том же спае тепло поглощается.

Для наблюдения этого явления можно использовать следующую схему: из фабричной термопары, имеющей два спая, делают две термопары с одним спаем. Можно использовать и самодельные термопары (например, медь-константан или железо-константан). Спаи двух термопар соединяют вместе (Термокрест) и термопары укрепляют на панели из любого изолятора с помощью массивных клемм с большой тепловой инерцией (рис. 1).

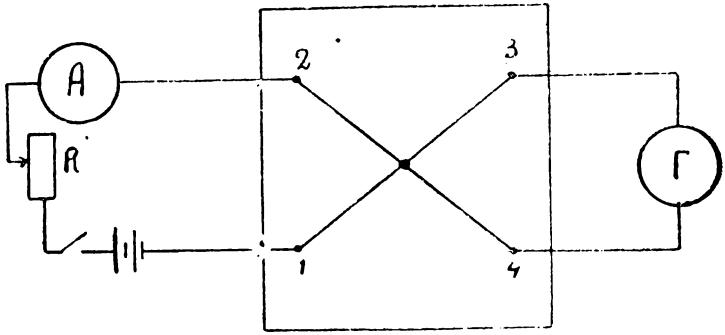


Рис. 1. Схема установки с термокрестом

Для лучшего контакта в месте соединения термопар необходимо соединить их сваркой или спаять оловом, припоем. Концы термопар припаять к клеммам 1, 2, 3, 4. Концы одной термопары 3, 4 присоединяются к чувствительному малоомному нуль-гальванометру (можно использовать и зеркальный гальванометр). Эта термопара служит термометром, который должен показывать, нагревается спай или остывает. Предварительно убеждаемся, в какую сторону отклоняется нуль-гальванометр при нагревании (соприкосновении с горячим предметом) и охлаждении (соприкосновение с холодной водой, льдом).

Концы второй термопары 1, 2 соединяются с источником постоянного тока через реостат и миллиамперметр. После проверки работы термопары 3, 4 приступаем к наблюдению явления Пельтье. Для этого пропускаем постоянный ток через термопару 1, 2, величина тока опре-

деляется из предварительных опытов или расчетным путем.

При этом стрелка гальванометра в цепи термопары 3, 4 покажет нагревание или охлаждение спая.

Если произошло нагревание, то необходимо изменить направление тока, тогда спай будет охлаждаться.

Эффект Пельтье наблюдается через 1—2 минуты, когда установится тепловое равновесие между спаем и окружающей средой. Подробное изучение явления Пельтье привело к открытию совершенно четкой закономерности. Оказалось, что количество тепла Q, выделяемое спаем, или наоборот поглощаемое им при обратном направлении тока, пропорционально току I и времени t, т. е. $Q=\Pi It$, где П — коэффициент Пельтье, численно равный тому количеству тепла, которое выделяется или поглощается спаем при протекании через него единицы количества электричества. При этом необходимо иметь в виду, что речь идет о тепле, выделяемом спаем дополнительно к обычному ленц-джоулезому теплу.

Качественно явление Пельтье объясняется наличием контактной разности потенциалов. При одном направлении тока в спае контактная разность потенциалов ускоряет электроны, сообщая им добавочную энергию ΠIt, которая выделяется в этом спае в форме добавочного количества тепла Q. При обратном направлении тока в спае контактная разность потенциалов замедляет электроны, при этом поглощается в спае количество тепла Q Однако наряду с поглощением тепла в спае в нем выделяется джоулево тепло.

Теплота Пельтье пропорциональна первой степени величины тока $Q=\Pi It$, в то время, как теплота Джоуля пропорциональна квадрату силы тока $Q=I^2Rt$.

Поэтому для получения охлаждения, необходимо подобрать определенную величину тока, которая может быть легко вычислена или подобрана экспериментально.

Если термопара имеет два спая, то при пропускании тока через термопару в одном из спаев контактная разность потенциалов ускоряет электроны, сообщая им добавочную энергию, которая выделяется в этом спае в форме добавочного количества тепла Q. При переходе через второй спай электроны замедляются контактной разностью потенциалов, здесь поглощается количество тепла Q.

Если нагревающийся спай за счет интенсивного теплоотвода поддерживать при постоянной температуре, то второй спай будет охлаждаться и может при этом отнимать тепло от какого-либо объекта, подлежащего охлаждению. Но эффект охлаждения, достигаемый при помощи металлических термопар, чрезвычайно мал. Только с разработкой полупроводниковых термопар оказалось возможным использовать явление Пельтье при изготовлении полупроводниковых термохолодильников (см. демонстрацию с комплектом полупроводниковых приборов [1]).

В 1950 году академик А. Ф. Иоффе разработал теорию энергетических применений полупроводниковых термоэлементов, а позднее были разработаны термоэлектрические холодильники.

Из полупроводников с нужными термоэлектрическими свойствами приготовляются отдельные элементы в форме, например, параллелепипеда. Затем элемент с электронным механизмом проводимости при посредстве металлической планки последовательно соединяется с элементом, имеющим дырочную проводимость. Этот элемент в свою очередь соединяется с третьим, но уже электронным, тот с четвертым, четвертый с пятым и т. д. (рис. 2). Получается столбик, составленный из некоторого числа последовательно соединенных чередующихся электронных и дырочных элементов.

Столбики, если в этом есть необходимость, могут со-

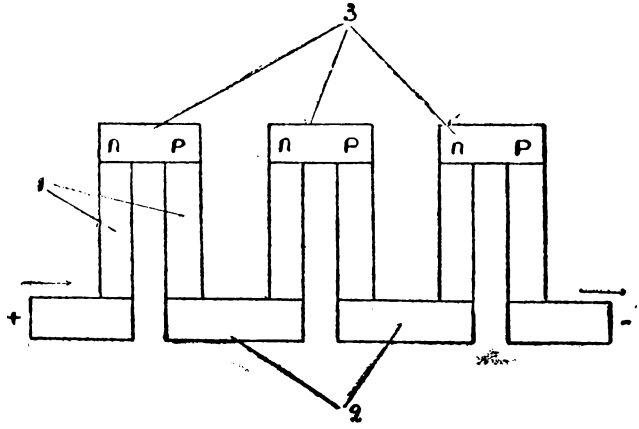


Рис. 2. Батарея термоэлементов

единяться друг с другом параллельно. Последовательное соединение элементов осуществляется таким образом, что получаются две системы спаев — по одну и по другую сторону батареи. Более ясное представление о способе соединений элементов можно получить, если представить, что все соединенные друг с другом полупроводниковые бруски поставлены стоймя на стол. Тогда одна система спаев будет касаться крышки стола, а вторая смотреть наружу.

Если через такую батарею элементов (рис. 2) пропустить электрический ток в направлении, указанном на рис. 2, то на спаях 2 будет выделяться теплота Пельтье, так как контактная разность потенциалов совпадает с направлением приложенного поля, а на спаях — 3 поглощается теплота, так как контактная разность потенциалов противоположно направлена приложенному полю. Если при этом спаи 2 за счет теплообмена с окружающей средой поддерживать при постоянной температуре T_0, то спаи 3 будут охлаждаться до такой температуры T, при которой теплота, приходящая на них из окружающей среды и по ветвям термоэлемента, не скомпенсирует поглощающуюся в них теплоту Пельтье.

Высокие термоэлектрические свойства полупроводников позволяют использовать их для создания самых разнообразных охлаждающих устройств.

II ЗАНЯТИЕ

ТЕМА «ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ»

План занятия

1. Принципы действия холодильных машин.
2. Полупроводниковые термоэлектрические холодильники.

Оборудование. Схема компрессорной холодильной машины, схема адсорбционной холодильной машины, схема полупроводникового термоэлектрического холодильника.

Содержание занятия

Предварительно необходимо повторить вопросы: испарение жидкостей, сжижение газов, работа при расширении газов, тепловые двигатели, явление Пельтье.

Холод получают путем отвода тепла от газообразного, жидкого или твердого тела. Во всех случаях тепло отводится от охлаждающего тела к охладителю. Например, теплое молоко в бидонах охлаждают в баках с холодной колодезной водой. Понижение температуры достигается также за счет расширения сжатых газов. Если предварительно сжать газ и затем предоставить ему возможность расшириться, то работа расширения газа будет совершена за счет тепловой энергии самого газа. При отсутствии притока тепла извне температура газа при расширении значительно понизится.

Это явление используется в особых газовых холодильных машинах, в которых рабочим телом служит воздух.

Огромное значение в холодильной технике имеет машинный способ получения холода, основанный на явлении испарения некоторых жидкостей при низких температурах.

В качестве испаряющегося вещества для холодильных машин средней и большой производительности широко применяется аммиак NH_3.

Компрессорная холодильная машина (рис. 3) состоит из испарителя С, компрессора К, конденсатора А и регулирующего вентиля V. Все эти главные части машины последовательно соединены между собой трубопроводами и образуют замкнутую систему.

Компрессор К нагнетает пары аммиака под давлением 12 кГ/см^2 в конденсатор А, помещенный в бак, где они охлаждаются проточной водой или окружающим возду-

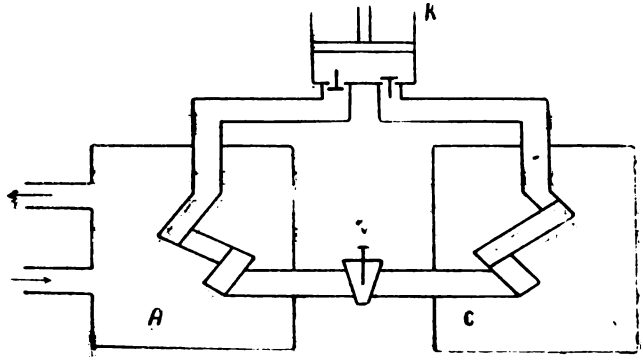


Рис. 3. Компрессорная холодильная машина

ком и обращаются в жидкость. Из конденсатора А аммиак через вентиль V поступает в испаритель С, где давление 3 кГ/см². В испарителе при низкой температуре жидкий аммиак испаряется за счет теплоты, отнимаемой от охлаждаемой среды, например, от воздуха камеры с пищевыми продуктами. Из испарителя аммиак отсасывается компрессором К.

Регулирующий вентиль предназначен для подачи в испаритель определенного количества жидкого холодильного агента, которое может там испариться под давлением тепла от охлаждающей среды.

Количество тепла, отнимаемое холодильной машиной от охлаждаемой среды в течение часа, называется холодопроизводительностью. Наиболее крупная аммиачная холодильная машина имеет холодопроизводительность 1. 700 000 ккал/час. Домашний холодильник имеет холодопроизводительность около 100 ккал/час.

Кроме компрессорных холодильных машин, для бытовых целей применяют адсорбционные холодильные машины, где сжатие рабочего газа достигается не с помощью компрессора, а путем поглощения (адсорбции) аммиака в воде.

Полупроводниковые холодильники обладают по сравнению с обычными (компрессорными, адсорбционными) рядом неоценимых преимуществ. Они не имеют никаких движущихся частей, просты в изготовлении, срок их службы практически безграничен. Основной частью такого холодильника является термобатарея.

Термобатарея в сборе состоит из следующих основных элементов (рис. 4):

1. Блок последовательно соединенных термоэлементов.

2. Наружный радиатор для отвода тепла от горячих спаев термопар.

3. Внутренний радиатор для теплообмена между холодными спаями и воздухом внутри холодильной камеры.

Для создания между радиаторами и термоблоком одновременно надежной электрической изоляции и хорошего теплового контакта между ними вставляется слюдяная пластинка толщиной 20—30 μ (4), смоченная с обеих сторон силиконовым лаком со взвешенной в нем алюминиевой пудрой.

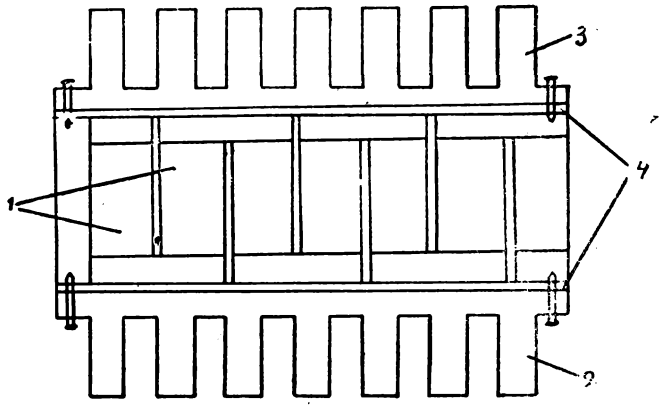


Рис. 4. Термобатарея холодильника

Радиаторы 2, 3 стягиваются между собой болтами, ввинченными в эбонитовые планки.

Радиаторы горячего спая изготовлены из меди, холодильного спая — из алюминия.

Термоэлементы изготовляются из теллуристого свинца PbTe (n — полупроводник) и интерметаллического соединения SbZn (p — полупроводник), или из твердого раствора PbTe—PbSe (n — полупроводник) и Bi_2Te_2 — — Sb_2Te_3 (p — полупроводник).

Одна термобатарея может обеспечить понижение температуры на определенное максимальное значение, зависящее от материала термоэлементов и температуры охлаждаемого предмета. Для более глубокого охлаждения необходимо использовать многокаскадные термобатареи.

Несколько термобатарей, допустим три, ставятся друг на друга. Одна батарея отделяется от другой тонкой электроизоляционной прокладкой. При такой конструкции холодные спаи первой (нижней) батареи охлаждают горячие спаи второй, в свою очередь холодные спаи второй батареи охлаждают горячие спаи третьей и т. д.

В результате действия такой многокаскадной батареи общий перепад температуры будет складываться из перепадов, имеющихся на каждой батарее. При этом каждый последующий каскад дает все меньшее снижение температуры. Например, трехкаскадная термобатарея из Bi_2Te_3 — Sb_2Te_3 (p — полупроводник) и PbTe—PbSe (n —

полупроводник) обеспечивает следующее максимальное снижение температуры:

от $T=100°C$ до $T=20°C$,
от $T=55°C$ до $T=0°C$,
от $T=25°C$ до $T=-15°C$.

Полупроводниковые термобатареи используются для создания самых разнообразных охлаждающих устройств. Эти устройства можно устанавливать на автомашинах, перевозящих скоропортящиеся продукты, в вагонах (рефрижераторах), на судах — всюду, где нужен холод и где есть источник постоянного тока.

Полупроводниковые охлаждающиеся устройства могут иметь любые размеры, от очень больших до совершенно минимальных. Термоэлектрический способ охлаждения приобретает особенно важное значение, когда возникает необходимость в охлаждении небольших объемов, микрохолодильники находят себе все более широкое применение, главным образом в радиотехнике. Они используются для охлаждения отдельных радиотехнических узлов и некоторых электронных, электронно-вакуумных и полупроводниковых приборов.

Некоторые данные о термоэлектрических холодильниках:

а) Бытовой холодильник модели 1957 года. Объем холодильной камеры 91 л, вверху камеры температура плюс 5°С, внизу минус 4°С. Состоит из 45 термоэлементов, холодопроизводительность одного термоэлемента 0,4 ккал/час. Электропитание осуществляется от германиевого выпрямителя, потребляемый оптимальный ток 25 а., потребляемая мощность от сети переменного тока 100 ватт.

б) Микротермостат для радиоприборов. Объем 76 $см^3$, вес прибора 390 г, высота прибора 120 мм, диаметр 65 мм.

Термобатарея состоит из 18 последовательно соединенных термоэлементов, питающий ток 8 а напряжение 1,2 в, максимальный перепад температур 30°С при окружающей температуре плюс 20°С.

Для поддержания постоянной температуры прибор имеет терморегулятор, который в зависимости от температуры в холодильной камере, посредством реле изменяет направление тока в термобатарее.

III ЗАНЯТИЕ

ТЕМА «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ»

План занятия

1. Объяснение и демонстрация учащимся работы трехэлектродной лампы.
2. Объяснение и демонстрация работы полупроводниковых триодов.
3. Сборка детекторного приемника с усилителем на полупроводниковом триоде.

Оборудование. Трехэлектродные или многоэлектродные лампы, лабораторный набор по радиотехнике, источники постоянного тока (выпрямитель, сухая анодная батарея, аккумуляторы), полупроводниковые триоды, комплект полупроводниковых приборов.

Содержание занятия

Повторить демонстрацию работы трехэлектродной лампы. Обратить внимание на роль сетки лампы и на необходимость включения в анодную цепь сопротивления R_a, а также на возможность многокаскадного усиления как высокой, так и низкой частоты.

Указать на недостатки усилителя на электронных лампах: громоздкость, большое потребление энергии, малый срок службы и другие.

Полупроводниковые триоды, называемые часто кристаллическими усилителями или транзисторами, представляют собой полупроводниковые трехэлектродные приборы, предназначенные для усиления, генерирования или преобразования электрических колебаний.

Полупроводниковые триоды, как и полупроводниковые диоды, могут иметь точечные или плоскостные контакты. Полупроводниковый триод представляет собой как бы два соединенных последовательно полупроводниковых диода или два электронно-дырочных перехода (см. рис. 5 и рис. 6.).

При отсутствии внешних напряжений в системе п-р-п переходов имеется равновесное распределение концентраций электронов и дырок, а на границах п и р — слоев образуются контактные разности потенциалов.

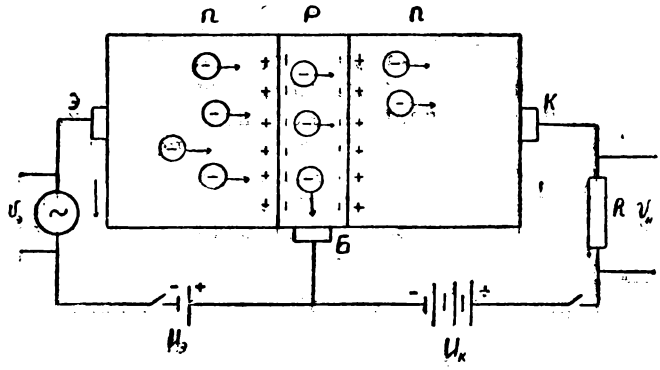


Рис. 5. Движение электронов в транзисторе n-p-n, включенном по схеме с общей базой

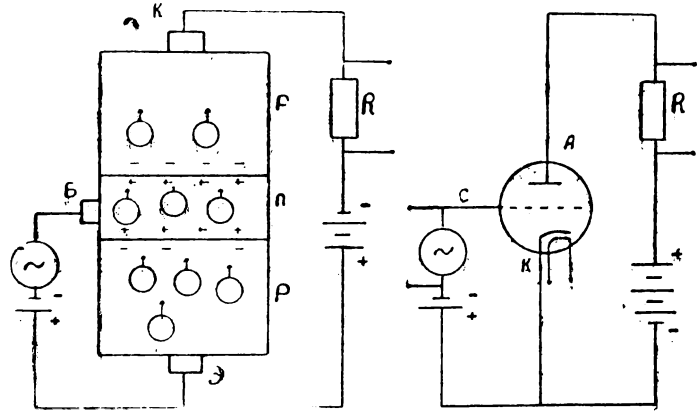


Рис. 6. а) Движение дырок в транзисторе p-n-p, включенном в схеме с общим эмиттером.
б) Аналогичная схема с общим катодом электронной лампы

Электронно-дырочные переходы полупроводникового триода можно продемонстрировать с помощью простейшего симметра (как у диода).

При работе триода к левому p-n переходу прикладывается прямое постоянное напряжение, а к правому — обратное (см. рис. 5).

Под действием приложенного электрического поля большая часть электронов из левой n-области, преодо-

левая контактную разность потенциалов, будет переходить в среднюю р-область. В средней области незначительная часть этих электронов рекомбинирует с дырками, являющимися в р-области основными носителями тока. Основная же часть электронов продолжает движение по направлению ко второму р-п переходу.

При приближении к нему электроны попадают в электрическое поле, созданное внешним напряжение U . Под влиянием этого поля электроны быстро втягиваются в правую п-область, что вызывает увеличение тока через правый р-п переход.

Левый электрод, служащий источником электронов в п-р-п триоде или источником дырок в р-п-р триоде, называется эмиттером. Правый (собирающий) электрод называется коллектором. Средний слой называется основным электродом или базой, а иногда его называют управляющим электродом.

Если на эмиттер (см. рис. 5), кроме постоянного напряжения, подать еще переменное, то благодаря изменению сопротивления запорного слоя будет меняться ток эмиттера, а следовательно, и ток коллектора, причем $\Delta I_э \approx \Delta I_к$, т. к. почти все носители, прошедшие через эмиттерный переход, достигают коллектора.

Сопротивление R мало влияет на ток в цепи правого электрода, даже если оно имеет большую величину (несколько килоом), т. к. сопротивление запорного слоя очень велико.

Импульс тока в цепи коллектора создает на высокоомном сопротивлении R соответственно значительный импульс напряжения. Сопротивление левого перехода мало, т. к. источник включен в прямом направлении, и на нем малый импульс напряжения создает достаточно большой ток.

Следовательно, малый импульс напряжения на входе создает большой импульс на выходе, т. е. получается усиление по напряжению и по мощности.

Усилительное действие триода демонстрируется по схеме, приводимой ниже.

Величина усиления полупроводникового триода зависит как от внутреннего сопротивления источника переменного напряжения, подключенного к эмиттеру, так и от нагрузочного сопротивления в цепи коллектора. Обычно коллекторное сопротивление исчисляется сотнями тысяч

и миллионами ом, а сопротивление цепи эмиттера — сотнями ом. Усиление полупроводникового триода может доходить до нескольких десятков раз.

По структуре и принципу действия полупроводниковый триод сходен с трехэлектродной лампой (см. рис. 6). Так эмиттер играет роль, аналогичную роли накаленного катода электронной лампы. Коллектор подобен аноду электронной лампы. Основание действует подобно находящейся на пути электронного потока управляющей сетке лампы.

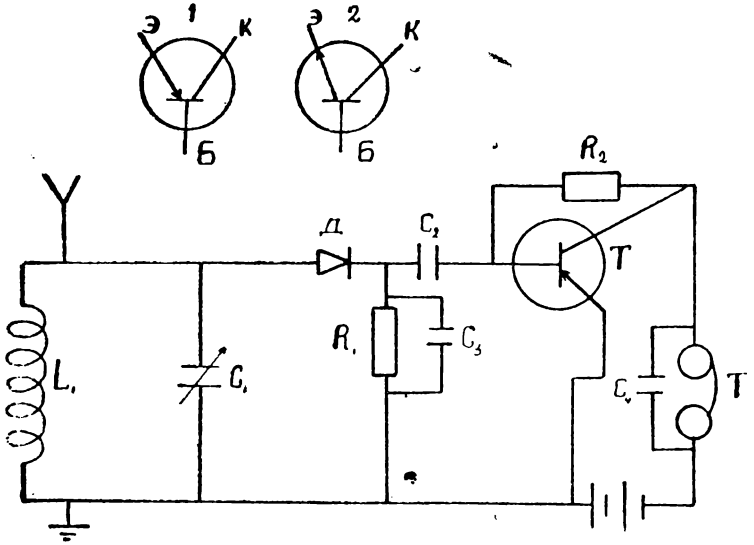


Рис. 7. а) Изображение транзисторов на схемах
б) Схема детекторного радиоприемника с усилителем на полупроводниковом триоде.

На рис. 7а показано распространенное схематическое изображение полупроводниковых триодов р-п-р (слева (1) и п-р-п (справа (2).

Получение триода типа р-п-р или п-р-п из германия можно представить себе следующим образом. В пластину германия с электронной проводимостью, служащую основанием триода, вплавляют с противоположных сторон капельки индия. В местах сплава германия с индием образуются области полупроводника с дырочной проводи-

мостью. Если же взять пластину германия с дырочной проводимостью и наплавить на нее капли сурьмы, то возле сурьмяных наплавок образуются области полупроводника с электронной проводимостью; получается триод типа n-p-n.

Имеются и другие способы получения переходов n-p-n и p-n-p.

Так, в полупроводниковых триодах с точечными контактами переходы получаются возле металлического острия, контактирующего с электронным полупроводником, после пропускания через контакты тока в определенном направлении.

Размеры полупроводниковых триодов невелики — их высота не больше 15—20 мм, вес немного больше 1 г.

Наша промышленность выпускает серии плоскостных полупроводников (триодов) (П) p-n-p или n-p-n и серии точечных триодов (С).

Условное обозначение триода включает три элемента: первый элемент — буква, характеризующая конструкцию триода (П — плоскостной, С — точечный), второй элемент — цифра, указывающая номер серии, третий элемент — буква, обозначающая тип прибора.

К основным параметрам триода относятся допустимое напряжение на коллекторе $U_к$, допустимый ток коллектора $I_к$, допустимый ток эмиттера $I_э$, предельно допустимая мощность рассеивания на коллекторе $P_к$, коэффициент усиления по току, по напряжению, по мощности.

Достигнутые в настоящее время высокие усилительные качества транзисторов позволяют успешно использовать их практически во всех электронных устройствах взамен электронных ламп. Уже существуют промышленные типы радиовещательных приемников («Заря»), устройств автоматики, счетно-решающих устройств и измерительных приборов, в которых все электронные лампы заменены германиевыми триодами. Эта аппаратура во всех случаях оказывается во много раз более компактной и экономичной, чем с электронными лампами.

Разработаны радиовещательные приемники на полупроводниковых триодах с питанием от «солнечной полупроводниковой батареи». Приемник содержит шесть триодов и два диода. Мощность принятых и усиленных сиг-

налов на выходе радиоприемника достаточна для нормального громкоговорящего воспроизведения передач местных и дальних средневолновых радиостанций. Фотобатарея состоит из 32 кремниевых фотоэлементов и обеспечивает питание приемника. Приемник может работать и от шести элементов для карманного фонаря.

На полупроводниковых триодах и диодах собираются радиопередатчики и приемники искусственных спутников Земли, питаемых от аккумуляторов, заряжаемых «солнечной батарей» из кремниевых фотоэлементов.

Полупроводниковые триоды имеют недостатки: нестабильность параметров при изменении температуры, большой разброс параметров от образца к образцу и др.

Главные достоинства полупроводниковых триодов: высокая экономичность, механическая прочность, малые размеры.

На кружковых занятиях по физике может быть собран усилитель для детекторного приемника на полупроводниковом триоде типа П13 или П16 (рис. 7б), генератор электрических колебаний звуковой частоты и другие более сложные приборы.

Приемник собирают из деталей лабораторного набора по радиотехнике, выпускаемого Главучтехпромом по схеме рис. 7б. $C_2=0{,}5—1{,}0\mu F$ служит для предотвращения короткого замыкания постоянного тока в цепи эмиттер-база триода.

Сопротивление R_3 подбирается экспериментально и служит для улучшения работы триода.

Более сложные схемы радиоприемников на полупроводниковых приборах можно найти в журнале «Радио».

Перед сборкой той или иной схемы с полупроводниковым триодом необходимо определить: тип триода (р-п-р или п-р-п), коэффициенты усиления триода по току.

а) Определение типа триода.

Для определения типа триода (р-п-р или п-р-п) можно воспользоваться омметром или простым пробником, состоящим из источника постоянного тока, дополнительного сопротивления и гальванометра.

Определив полярность источника и цоколевку триода (по справочнику), присоединяем пробник одним концом к базе, другим поочередно к эмиттеру и коллектору, затем меняем полярность. Определяем полярность

р-п переходов по току, показываемому гальванометром. Если величина тока при первоначальной полярности больше, чем при противоположной, то р-п переход включен в первом случае в прямом направлении, т. е. к р-области приложен плюс источника, а к п-области приложен минус источника, и наоборот, если в первом случае ток меньше, чем при противоположной полярности, то р-п переход был включен в первом случае в запорном направлении, т. е. к р-области приложен минус источника, а к п-области приложен плюс источника. Определив полярность р-п переходов (коллектор—база, эмиттер—база) делаем вывод о типе триода. При пользовании тестором (омметром) общая клемма омметра является положительным полюсом внутреннего источника тока.

б) Усилительные свойства триода.

Полупроводниковый триод, как и трехэлектродная лампа, обладает усилительными свойствами.

С его помощью можно усиливать напряжение и мощность постоянного и переменного тока. Усиление происходит за счет энергии источников питания, а триод выполняет функцию своеобразного регулятора, который под воздействием слабых входящих сигналов изменяет токи в выходной цепи, обладающей большим сопротивлением и получающей питание от источника с большим напряжением.

Усилительное свойство полупроводникового триода можно продемонстрировать, собрав схему рис. 8, где ис-

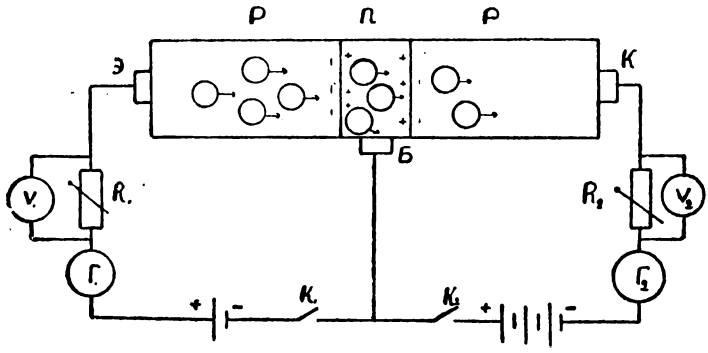


Рис. 8. Схема демонстрации усилительного свойства полупроводникового триода

пользуются школьные демонстрационные вольтметры и гальванометры. При изменении сопротивления R_1 в цепи эмиттера ток коллектора изменяется, т. к. ток в цепи коллектора создается носителями заряда эмиттера.

Показать изменение тока коллектора ≈ равное изменению тока эмиттера. В то же время величина коллекторного тока почти не зависит от изменения сопротивления в цепи коллектора, т. к. сопротивление коллекторного перехода, включенного в запорном направлении, велико. (Проверить, изменяя сопротивление R_2).

Определить изменение напряжения, показываемого вольтметром V_1 (при изменении тока реостатом Rr), и изменение напряжения на нагрузке R_2 в цепи коллектора, показываемого вольтметром V_2.

Сравнить прирост напряжения в цепи коллектора с приростом напряжения в цепи эмиттера и сделать вывод об усилении по напряжению и по мощности. Вычислить $\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1}$. Когда на вход триода подается переменное напряжение, то эмиттерный ток становится пульсирующим. Аналогично начинает изменяться и ток коллектора.

Так как сопротивление нагрузки в цепи коллектора в несколько раз больше сопротивления цепи эмиттера, а ток коллектора почти равен току эмиттера, то амплитуда переменной составляющей напряжения, созданного коллекторным током на нагрузке, в несколько раз больше амплитуды переменного напряжения на входе эмиттера. Таким образом, полупроводниковый триод усиливает напряжение.

В усилителях триоды чаще включаются по схеме с общим эмиттером, которая позволяет получить усиление не только по напряжению, но и по току.

Важнейшим параметром транзистров является статический коэффициент усиления по току α для схемы с общей базой (рис. 8). Он представляет собой отношение изменения тока коллектора $\Delta I_к$ к вызвавшему его изменению тока эмиттера $\Delta I_э$ при постоянном напряжении коллектор-база $U_к$.

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э}.$$

Вычислить α по полученным данным.

Он имеет значение для плоскостных транзисторов порядка 0,8—0,97 и выше. Пользуются также статическим коэффициентом усиления по току β для схемы с общим эмиттером (рис. 6), который показывает, во сколько раз изменение тока коллектора больше изменения тока базы при постоянном напряжении коллектор-эмиттер.

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}.$$

Нетрудно получить простые формулы, связывающие друг с другом коэффициенты α и β. Так как для транзистора всегда существуют соотношения между токами: $I_э = I_к + I_б$ и соответственно $\Delta I_э = \Delta I_к + \Delta I_б$, то разделив обе части равенства $\Delta I_э = \Delta I_к + \Delta I_б$ на $\Delta I_к$ получим;

$$\frac{\Delta I_э}{\Delta I_к} = 1 + \frac{\Delta I_б}{\Delta I_к} \qquad \frac{1}{\alpha} = 1 + \frac{1}{\beta} \text{ отсюда; } \alpha = \frac{\beta}{1+\beta},$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}.$$

Зная α, определить по формуле значение коэффициента β. Для получения точного значения β необходимо знать приращение токов коллектора и базы, так как $\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}$.

Однако для большинства транзисторов зависимость $I_к$ от $I_б$ прямо пропорциональная, т. е. величина β для данного триода практически постоянна и можно считать, что $\beta = \frac{I_к}{I_б}$. Таким образом, измерив $I_к$ и $I_б$ можно вычислить β.

Для измерения токов пользуются прибором, схема которого дается на рис. 9. Проверяемый транзистор подключается к зажимам к, б, э.

К — коллектор
б — база
э — эмиттер
Вк — ключ

ma — миллиамперметр

μa — микроамперметр

Е — батарея на 4.5 в,

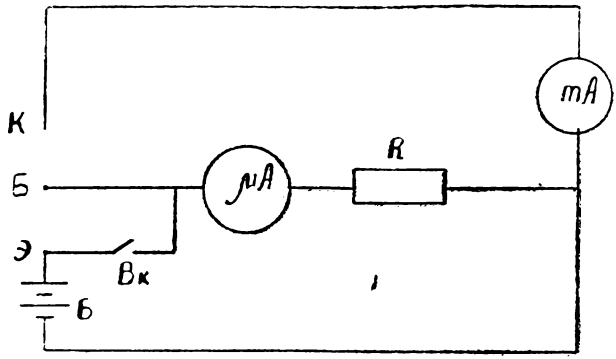


Рис. 9. Схема прибора для определения β.

1. Измерение $I_{ко}$ (обратного тока) для триода р-п-р (рис. 9).

При замкнутом ключе «Вк» через миллиамперметр будет протекать только обратный ток коллектора $I_{ко}$. В хороших транзисторах $I_{ко}$ не должен превышать 20—30 μa.

2. Измерение β. При размыкании ключа «Вк» транзистор включается по схеме усилителя постоянного тока с общим эмиттером. В цепи базы от батареи Б протекает ток $I_б$, величина которого измеряется микроамперметром. Протекание тока в цепи база — эмиттер вызывает появление в цепи коллектор—эмиттер тока $I_к$. Ток коллектора $I_к$ измеряется миллиамперметром, включенным в его цепь.

По измеренным данным $I_б$, $I_к$ вычисляется коэффициент усиления по току β. Коэффициент усиления β отдельных транзисторов колеблется от 10—20 до 200—300.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Буров. Комплект полупроводниковых приборов. «Физика в школе». № 6, 1961.

2. В. А. Буров. «Методика изучения полупроводников в школе», М., 1965.
3. А. А. Покровский и др. «Физический эксперимент в школе». М., 1964.
4. И. Н. Лобанова. «Полупроводниковые диоды и триоды». М., 1958.
5. А. Ф. Иоффе. «Полупроводниковые термоэлементы». М., 1960.
6. Л. Д. Сокол. «Выбор схемы и налаживание транзисторного приемника». Приложение к журналу «Юный техник», № 13, 1966.
7. «Полупроводники в науке и технике». Сб. в 2-х томах. Изд. АН СССР, 1957—1958.
8. Г. С. Ландсберг. «Элементарный учебник физики», т. I, М., 1958.

Н. А. ДЕМОКРИТОВ

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Обычно в школах лабораторные работы проводятся звеньями по 3—4 ученика, такая система нередко приводит к тому, что часть учащихся работу выполняет пассивно, лишь наблюдая, как ее выполняет товарищ.

Чтобы активизировать учащихся и развить самодеятельность у всех членов звена при выполнении каждой операции лабораторной работы, учитель следит за работой учащихся и своими замечаниями побуждает пассивных.

На следующих уроках физики учитель в порядке устного опроса вызывает отдельных учащихся и предлагает им или рассказать ход выполнения работы, или проделать ее практическую часть на демонстрационном столе. Эти меры до некоторой степени повышают активность учащихся, но все же не дают учителю уверенности в приобретении соответствующих практических навыков всеми учащимися.

Для повышения активности и самодеятельности всех учащихся в выполнении лабораторных работ и с целью более точного учета, приобретаемых ими практических навыков рекомендуется вводить в практику школ контрольные лабораторные работы, вопрос о которых впервые был поднят в 1956 году[1]. Но, к сожалению, этот вид урока еще не получил в школах должного распространения.

---

[1] Ц. П. Кац. Контрольная лабораторная работа. «Физика в школе», № 5, 1956.

Время проведения контрольных лабораторных работ необходимо устанавливать в начале учебного года при общем планировании учебного материала в данном классе. Проводить их следует во всех классах, начиная с шестого. Учащимся следует сообщить о запланированных контрольных работах перед началом выполнения первой лабораторной работы и напоминать во время выполнения каждой из последующих лабораторных работ.

Контрольные работы следует проводить один или два раза в год, исходя из годового количества лабораторных работ в данном классе. Включать в контрольную работу желательно все или почти все работы, выполненные учащимися за соответствующий период. Так, например, в восьмом классе программой 1964 г. предусмотрено в каждом учебном полугодии выполнить по 8 работ.

В этом классе лучше всего провести два урока контрольных работ по полугодиям.

В 9-м классе программой 1965 г. предусмотрено 10 работ. Здесь можно провести одну контрольную работу в конце учебного года, включив в нее все работы.

Предупреждение о запланированной контрольной работе побуждает учащихся сознательнее относиться к выполнению лабораторных работ в течение учебного года.

Следует иметь в виду, что контрольная лабораторная работа не отменяет ни одну из существующих форм учета успеваемости, а лишь дополняет их.

Готовясь к проведению намеченной контрольной работы, учитель физики, прежде всего, должен учесть имеющееся лабораторное оборудование. Необходимо, чтоб каждый учащийся данного класса был обеспечен полным комплектом оборудования для работы. Если, например, в классе 30 учащихся, а контрольная работа включает 6 лабораторных работ, то, следовательно, оборудование каждой из 6 лабораторных работ должно быть подготовлено в лучшем случае в 5 комплектах. Но в зависимости от наличия оборудования можно допускать и не равное количество комплектов по каждой работе. Обязательно соблюдение лишь главного принципа: каждый ученик должен быть обеспечен отдельным комплектом приборов по заданной ему лабораторной работе.

Каждый билет содержит номер и название той лабораторной работы, которую ученик должен выполнить

Допустимо выставлять все оборудование на 2—3-х отдельных столах с тем, чтобы учащиеся, получив билет, сами определяли, какие им нужны приборы, брали их и ставили на свои рабочие места. Однако здесь возникает ряд трудностей. Неминуемо создается скопление учащихся у столов с приборами, причем здесь трудно избежать некоторого «обмена мнений» между ними. На выбор и перенос приборов тратится определенное время, учителю труднее распределить учащихся по намеченным местам. В результате всех этих задержек много учащихся не поспевает за урок оформить работу. Поэтому целесообразно приготовленные комплекты оборудования выставлять (накануне урока) сразу на столы учащихся. В этом случае урок начинается организованнее, без лишней потери рабочего времени.

Конечно, лучше, если у каждого учащегося отдельный стол. Однако по необходимости можно допустить установку на стол оборудования двух (конечно различных) лабораторных работ. Во всяком случае имеющиеся в лаборатории столы должны быть все использованы. Порядок распределения оборудования должен быть хорошо продуман, чтоб учащиеся, выполняющие одинаковые работы, находились друг от друга на максимальном расстоянии.

За 35—40 минут каждый учащийся должен проделать указанную работу и оформить отчет о ней. Отчет содержит следующие данные: название и номер лабораторной работы (с билета), схематический чертеж установки или схема электрической цепи, таблица с полученными данными, краткое описание хода работы, вычисления и окончательный результат (с учетом ошибок измерений). В целях экономии времени не следует требовать от учащихся в отчете перечня выданного им для работы оборудования.

Во время выполнения контрольной работы учитель, как обычно, следит за самостоятельностью работы учащихся, за правильностью использования ими полученного оборудования, правильностью составления электрических цепей, отвечает на некоторые вопросы учащихся и т. д.

За 5—6 минут до звонка следует предупредить класс об оставшемся до конца урока времени.

Каждый ученик, выполнивший лабораторную работу,

сдает учителю отчет о ее выполнении, а использованное оборудование переносит на указанное место.

Отчеты учащихся следует проверить и выставить оценки в классный журнал до очередного урока физики. В начале этого урока учитель дает краткий анализ результатов проведенной работы и объявляет оценки учащимся. С учащимися, получившими неудовлетворительные оценки, следует организовать несколько дополнительных занятий, после чего целесообразно провести с ними контрольную работу снова, но уже во внеурочное время.

В качестве примера опишем проведение контрольной лабораторной работы учительницей физики средней школы № 37 г. Ульяновска Т. А. Протасенко в 10 классе.

В приготовленные билеты были включены следующие работы:

1. Определение внутреннего сопротивления элемента и ЭДС источника тока (5 комплектов).
2. Определение удельного сопротивления проводника (5 комплектов).
3. Определение оптической силы и фокусного расстояния линзы (6 комплектов).
4. Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом падения капель (5 комплектов).
5. Определение электрохимического эквивалента меди (4 комплекта).
6. Проверка зависимости между объемом и давлением для данной массы газа при неизмененной температуре (2 комплекта).

Всего лабораторных установок было подготовлено к уроку 27 (соответственно с количеством учащихся в классах). Количество комплектов отдельных работ определялось оборудованием физического кабинета.

Размещение учащихся по местам заняло в начале урока всего 4 минуты, после чего все они уже приступили к работе. От учащихся требовалось выполнить работу и написать отчет (с учетом ошибок измерений). Урок проходил в спокойной, деловой атмосфере.

Затруднения в выполнении лабораторной работы имели лишь трое учащихся, все остальные справились с работой успешно, обнаружив достаточные теоретические знания и хорошие практические навыки в обращении с приборами.

Р. М. РАЗНИК, Н. А. ЭЛАТОМЦЕВА

ОБЪЯСНЕНИЕ ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ СОЛНЦА ПРИ ПОМОЩИ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ НЕБЕСНОЙ СФЕРЫ

Видимое движение Солнца является одной из трудных тем курса астрономии, так как требует от учащихся развитого пространственного воображения.

Рекомендованные в качестве наглядных пособий модели небесной сферы (1, 2) весьма громоздки и содержат множество деталей, потому что служат для объяснения не только видимого движения Солнца, но и для решения многих других задач сферической астрономии.

В астрономическом кабинете Ульяновского государственного педагогического института нами изготовлена и применяется в учебном процессе упрощенная модель небесной сферы в проекции на плоскость главного меридиана, содержащая только те линии и плоскости, которые необходимы для объяснения видимого движения Солнца (рис. 1).

Неподвижная часть прибора выполнена в виде диска, выкрашенного светлой краской. На диске контрастными красками нанесены отвесная линия ZZ' и линия небесного горизонта. От горизонта до зенита и надира нанесены деления (0°—90°), заданы и обозначены стороны горизонта: север — С и юг — Ю; восток — В и запад — З в данной проекции совпадают с центром круга. Диск укреплен на подставке и может стоять на столе в вертикальной плоскости.

На ось, перпендикулярную диску и проходящую через его центр, крепится подвижная часть прибора, состоящая из трех параллельных планок, укрепленных на перпенди-

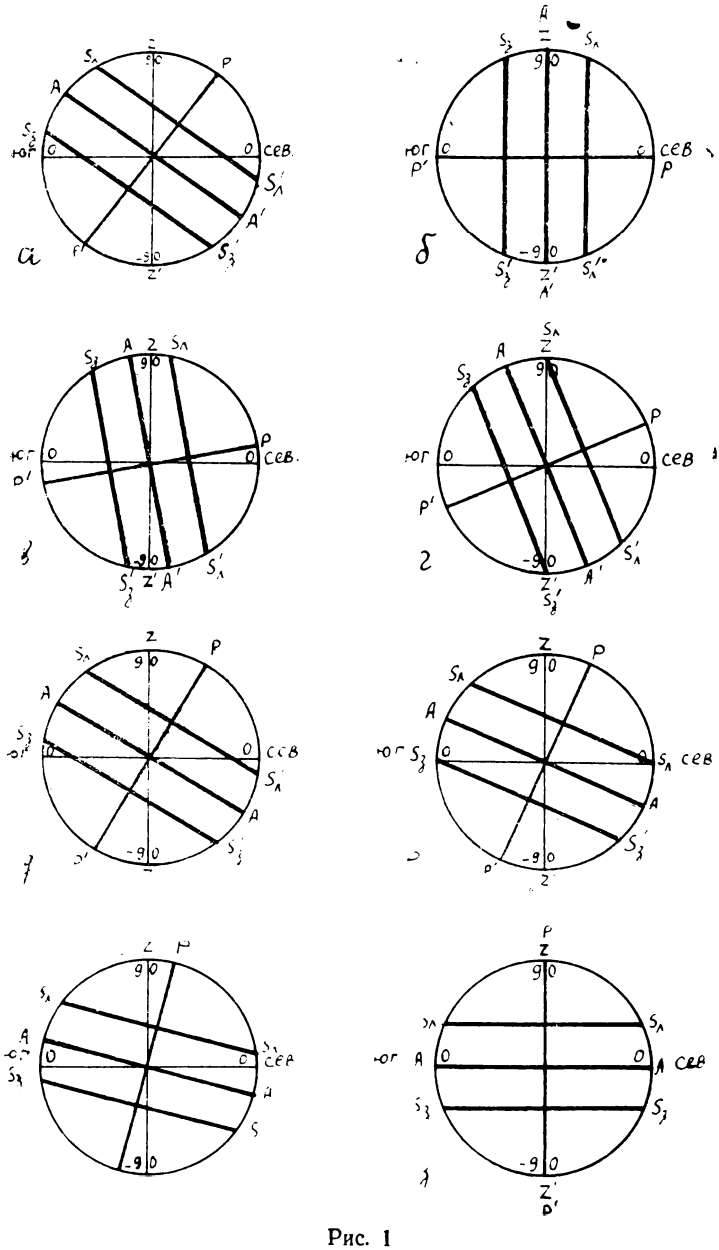


Рис. 1

кулярной им четвертой, соответствующей оси мира PP′.

Средняя из параллельных планок изображает экватор AA′.

Верхняя и нижняя — предельные суточные параллели Солнца ($S_{лето}$ $S'_{лето}$, $S_{зима}$ $S'_{зима}$) — отстоят от экватора на угловом расстоянии, равном $\varepsilon = 23°27'$. Между предельными параллелями располагаются все суточные параллели Солнца.

Перейдем к описанию видимого движения Солнца.

Рассмотрим сначала видимое годичное движение Солнца по отношению к горизонту на данной географической широте места наблюдения, например, на широте города Ульяновска ($\varphi = 54°,3$). Подвижную часть прибора устанавливаем так, чтобы ось мира составляла с горизонтом угол φ, равный 54° (рис. 1а).

Наблюдатель, находясь в центре сферы, видит Солнце только на тех участках суточных параллелей, которые находятся над горизонтом, в верхней половине диска, и не видит Солнца тогда, когда оно под горизонтом, в нижней половине диска.

В день весеннего равноденствия (21 марта), когда суточная параллель Солнца совпадает с экватором, день равен ночи, ведь при пересечении с горизонтом экватор делится пополам! В этот день Солнце восходит точно в точке востока и заходит точно в точке запада; полуденная высота Солнца на юге $ЮА = 90° - \varphi$. В последующие дни точки восхода и захода постепенно смещаются к северу, часть суточной параллели, находящаяся над горизонтом, дневная, возрастает, а часть, расположенная под горизонтом, ночная, уменьшается, полуденная высота Солнца на юге растет.

В день летнего солнцестояния смещение точек восхода и захода к северу достигает максимума для данной широты места наблюдения, максимума достигает и полуденная высота Солнца $(90° - \varphi + \varepsilon)$. После 21 июня дни начинают убывать, а ночи возрастать. Солнце по спирали опять приближается к экватору AA′. Точки восхода и захода движутся соответственно к востоку и западу и в день осеннего равноденствия так же, как и в день весеннего равноденствия, Солнце проходит по экватору, его суточная параллель делится горизонтом пополам. В последующие дни «надгоризонтальная» часть суточных па-

раллелей уменьшается, а «подгоризонтальная» растет. Все короче путь Солнца над горизонтом, поэтому и точки восхода и захода перемещаются к югу.

23 декабря наступает самый короткий день, в который Солнце поднимается не выше, чем на $ЮS\lambda = 90° - \varphi - \varepsilon$. После дня зимнего солнцестояния Солнце опять «возрождается», его параллели приближаются к экватору, поэтому дни растут, а ночи «тают». И так — каждый год.

Чем отличается видимое годичное движение Солнца на других географических широтах от видимого движения Солнца в Ульяновске?

Начнем с географической широты $\varphi = 0°$ (рис. 1б). Установив соответствующим образом подвижную часть прибора, замечаем, что сразу после восхода Солнце круто поднимается вверх, его полуденная высота $\geqslant 66°33'$; вечером Солнце круто опускается к горизонту, как бы падает за горизонт. Почти без сумерек наступает ночь, потому что Солнце также круто уходит глубоко под горизонт к надиру. Ночи темные, звездные, и длятся они всегда по 12 часов. А вблизи равноденствий, когда в Ульяновске весна и осень, на экваторе полуденная высота Солнца достигает максимума, Солнце проходит через зенит $ЮA = 90°$, наступает жаркое время года (два раза в году «лето»).

На широте $\varphi = 15°$ (рис. 1в) Солнце движется почти так же, как и на экваторе, но продолжительность дня и ночи в течение года не остается постоянной, а немного варьируется. Солнце бывает в полдень в зените 2 раза: один раз — между днем весеннего равноденствия и днем летнего солнцестояния, когда Солнце по спирали поднимается к предельной суточной параллели, и второй раз — после дня летнего солнцестояния, когда Солнце также по спирали опускается к экватору.

На широте $\varphi = 23°27'$ (тропик) Солнце только один раз в году проходит точно через зенит ($S\lambda$ совпадет с зенитом Z) (рис. 1г).

На средних широтах движение Солнца происходит примерно так же, как и в Ульяновске. Но с увеличением угла φ, угол между экватором и горизонтом уменьшается и, следовательно, полуденные высоты Солнца будут также уменьшаться. Чем больше φ, тем короче зимние дни и

длиннее зимние ночи, тем длиннее летние дни и короче и светлее летние ночи (рис. 1д).

Вблизи дней летнего и зимнего солнцестояния смещение точек восхода и захода происходит медленнее, благодаря чему продолжительность дня и полуденная высота Солнца изменяются незначительно (термин «солнцестояние»). Вблизи равноденствий смещение точек восхода и захода происходит гораздо быстрее, поэтому и день возрастает (или убывает) весьма заметно. В то время, как на низких широтах отклонение точек восхода и захода от точек востока и запада составляет примерно 24°—25°, в высоких широтах оно достигает 90°! Это означает, что Солнце может восходить в любой точке восточного горизонта и заходить в любой точке западного горизонта, вплоть до точек севера и юга.

Это легко увидеть на приборе, если увеличивать угол между осью мира и горизонтом (угол φ): точки пересечения суточных параллелей с горизонтом распределяются по всему горизонту.

Географическая параллель, на которой в дни солнцестояний происходит слияние точек восхода и захода Солнца, называется полярным кругом. На этой широте $\varphi = 66°33'$ (рис. 1е) в день летнего солнцестояния Солнце в полдень опускается к горизонту в точке севера и в этой же точке начинает снова восходить, поэтому двое суток сливаются в сплошной день. В день зимнего солнцестояния в полдень Солнце восходит в точке юга и тут же опять заходит, поэтому двое суток сливаются в сплошную ночь (между ночами нет дня).

В местах, расположенных за полярным кругом (рис. 1ж), с увеличением φ увеличивается продолжительность летних слитных дней и зимних слитных ночей. Все большее число суточных параллелей Солнца не пересекает горизонт, а проходит над ним летом или под ним зимой. Полярный день начинается до и заканчивается после летнего солнцестояния. За каждые 24 часа Солнце совершает круг над горизонтом, причем с каждым днем плоскость его суточной параллели, наклоненная под углом $90° - \varphi$ к горизонту, поднимается все выше. После летнего солнцестояния Солнце приближается к горизонту, полярный день кончается. День разрывается короткой «ночью», вернее, сумерками. Достигнув в день осеннего равноденствия продолжительности в 12 часов, ночь про-

должает возрастать, а на долю дня остаются часы, затем только минуты. Перед днем зимнего солнцестояния наступает такой «день», когда Солнце совсем не поднимается из-за горизонта.

В последующие сутки Солнце по спирали опускается под горизонт все ниже и ниже. Первое время оно еще совсем близко под горизонтом, и поэтому заря может продолжаться несколько суток, перемещаясь вслед за Солнцем вдоль всего горизонта! Затем ночи становятся все темнее, светает лишь к полудню. День зимнего солнцестояния — середина полярной ночи — самое темное время года. После окончания полярной ночи наступает весна, и опять каждые сутки Солнце восходит и заходит.

А на самом полюсе ($\varphi=90°$) день и ночь сменяется только один раз в дни равноденствий, т. е. когда экватор AA' совпадает с горизонтом ЮС (рис. 1з). (В действительности на полюсе день длинее ночи из-за преломления солнечных лучей в атмосфере земли и других причин).

На модели можно демонстрировать и видимое движение Солнца в южном полушарии. В этом случае ось мира образует угол φ над южной частью горизонта. Солнце в полдень кульминирует над северным горизонтом. Времена года — противоположны нашим.

Описанная модель позволяет также наглядно показать причину разделения земной поверхности на тепловые пояса. В жарком поясе зенит находится внутри области, занимаемой суточными параллелями Солнца. При $\varphi=23°27'$ зенит оказывается на границе этой области, а при $\varphi>23°27'$ — выходит за ее пределы. Условия умеренного пояса (Солнце не бывает в зените и каждый день восходит и заходит) нарушаются и на полярном круге, где начинается зона летних слитных дней и зимних слитных ночей.

Значит, произвольно «сдвигать» тропики и полярные круги нельзя (например, вместо «неудобной» широты тропика $23°27'$ взять «круглое» значение $25°$, а вместо широты полярного круга $66°33'$ — взять $65°$).

Географическая широта тропиков и полярных кругов задается самой природой, наклоном земной оси к плоскости эклиптики ($66°33'$) или, что то же самое, наклоном плоскости экватора к плоскости эклиптики ($23°27'$).

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Дагаев. Лабораторный практикум по курсу общей астрономии. Издательство «Высшая школа», 1963.

2. Е. П. Левитан. Методика преподавания астрономии. Издательство «Просвещение», 1965.

Н. И. ВЫГАНОВСКИЙ, В. В. БОГДАНОВ

ДЕМОНСТРАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

В статье предлагается опыт по улучшению существующих демонстрационных приборов и изготовлению новых демонстрационных приборов, улучшающих наглядность обучения. Основными требованиями при изготовлении приборов являются: возможность их изготовления в условиях кабинета физики, наглядность, безотказность в работе и возможность демонстраций при малых напряжениях и незначительных силах тока.

Действие магнитного поля на ток

Схема этого опыта предлагается во многих курсах физики. Мы предлагаем изготовленный нами прибор, на котором в большой аудитории наглядно и безотказно демонстрируется правило левой руки. Общий вид прибора представлен на рис. 1.

На рис. 2 представлена схема прибора.

Два параллельных проводника а,а из дюралюминиевых трубок укреплены на общей панели (размеры даны в мм). Проводник б — подвижная дюралюминиевая трубка, на которой демонстрируется действие магнитного поля.

Внешнее магнитное поле создается электромагнитом в.

При подаче напряжения 4—5 в на «рельсы» (а, а) (ток 4—5 а) и 20 в на электромагнит (в) (ток 2 а), подвижная часть — проводник (б) свободно перемещается (катится) по «рельсам» аа. Поворачивая электромагнит в (меняя полюса), можно проводник (б) перемещать по рельсам из конца в конец прибора.

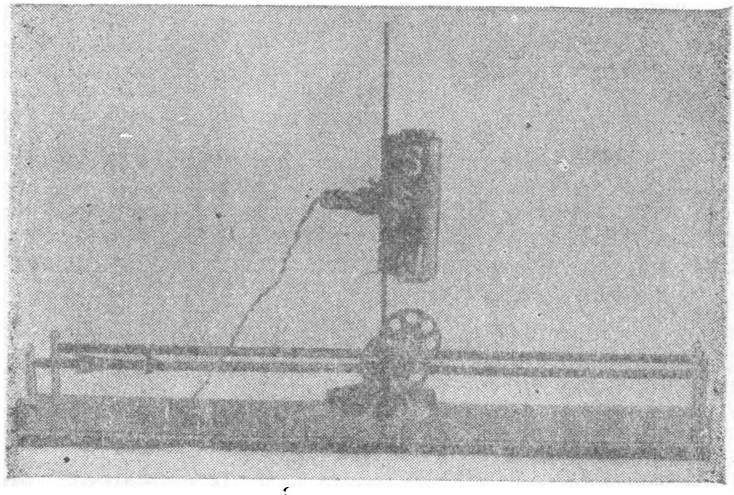


Рис. 1

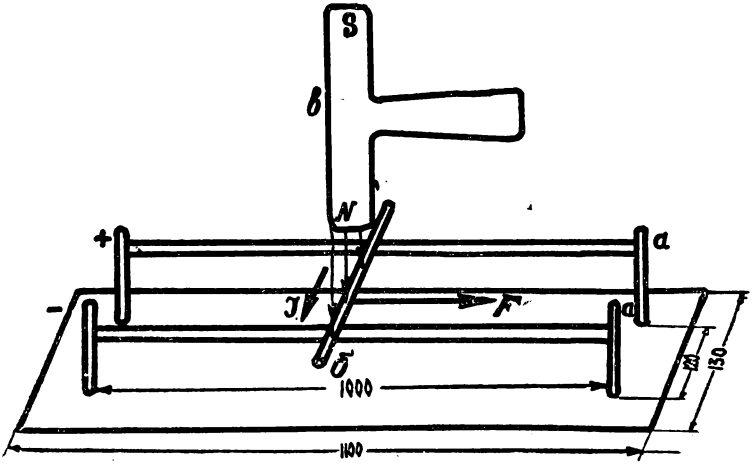


Рис. 2

Практические советы

1. В качестве несущих проводников — «рельсов» можно использовать трубки от лыжных дюралюминиемых палок.

2. Подвижный проводник б изготовляется из тех же трубок, но максимально облегчается, что достигается обточкой его на токарном станке.

3. Для лучшего зрительного эффекта по концам подвижного проводника трубки приклеиваются два кружка из ватмана, на которые яркой краской по диаметру наносятся жирные линии (см. рис. 1).

4. Для электромагнита используется железный сердечник, размеры которого даны на рис. 3.

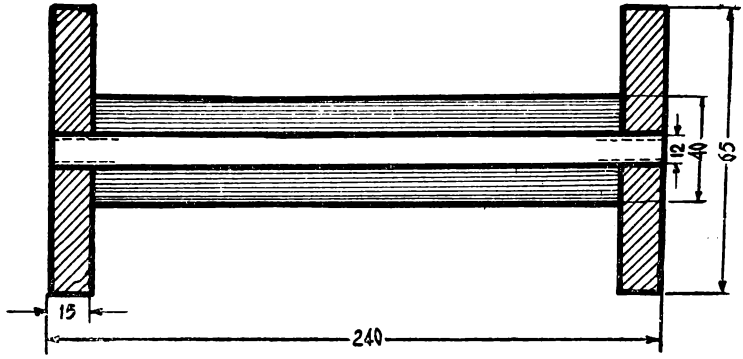


Рис. 3

Сердечник набирается из отдельных железных прутьев. Центральный прут несколько толще и длиннее, на него насаживаются или навинчиваются железные шайбы, удерживающие обмотку и хорошо концентрирующие магнитное поле. На сердечник наматывается провод ПЭ или ПЭШО диаметром 1 мм. Количество витков N=1750.

5. Электромагнит заключается в кожух из листового дюралюминия и окрашивается в красный и синий цвета, как это принято для постоянных магнитов, белой краской помечаются полюса «S» и «N».

6. На «рельсы», несущие ток, надеваются стрелки — указатели направления тока.

7. Эффективность демонстрации увеличивается, если ток в «рельсы» поступает через демонстрационный школьный амперметр, указывающий и протекание тока через прибор, и его величину (если поднять трубку (б), то цепь разрывается — ток прекращается).

Действие магнитного поля тока. Рамка с током в магнитном поле тока

Для получения сильного магнитного поля тока изготовляется большая деревянная рама, на лицевой стороне которой в соответствии с ее размерами компактно помещаются 50 витков изолированного провода. Все витки берутся в общую дополнительную изоляцию (изоляци-

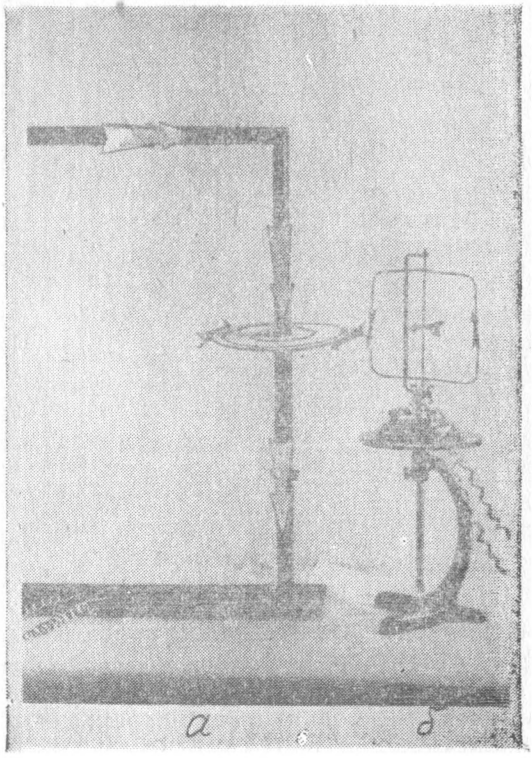


Рис 4

онная лента), так что внешне на раме обозначается один толстый провод.

Общий вид большой рамы с обмоткой представлен на рис. 6а.

Размеры рамки и схематическое расположение обмотки представлены на рис. 5.

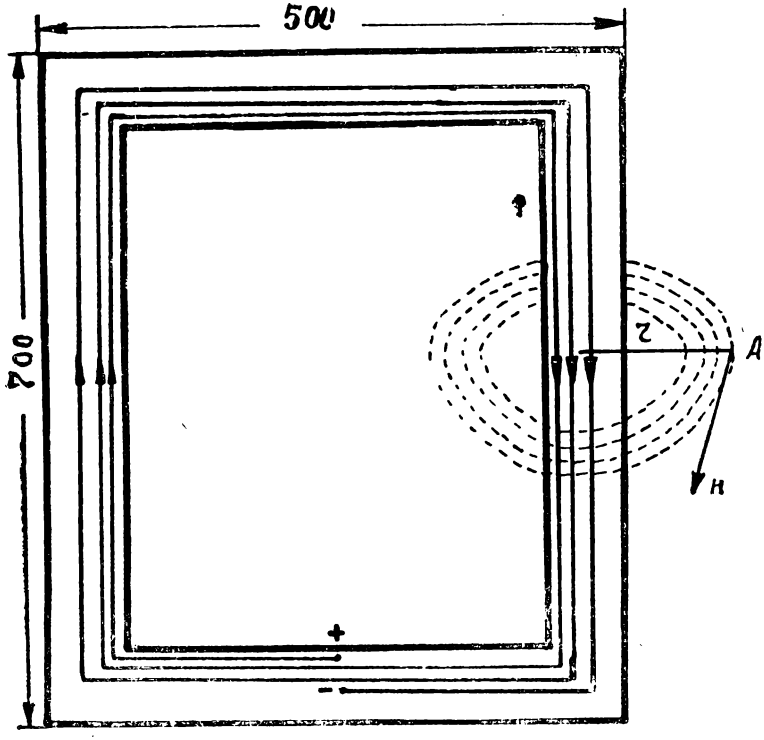


Рис. 5

При последовательном прохождении тока по виткам обмотки, он течет параллельно в одном направлении в каждом витке, вследствие чего магнитное поле от каждого витка будет иметь одинаковое направление.

Для любой точки А (рис. 5) за пределами рамы магнитное поле будет определяться суммой полей, давае-

мых всеми витками, что практически можно выразить следующей формулой:

$$H \cong k \frac{2nI}{r},$$

где n — число витков на раме.

При наличии напряжения 16—18 в, ток в раме составляет 4 ампера.

В качестве рамки-индикатора (рис. 4б) используется школьный прибор — «виток в магнитном поле земли». Рамка представляет собой алюминиевый каркас 16×16 см², на который помещено 20 витков провода (d=0,2 мм ПЭШО). Концы обмотки подсоединяются к двум кольцам, укрепленным на оси рамки вместо двух полуколец коллектора. Ток через скользящие контакты подается на кольца и, следовательно, на рамку.

К одному из вертикальных проводов большой рамы прикрепляется горизонтальный круг с ободом, на ободе вычерчивается направление магнитного поля и прикрепляются векторы, указывающие направление напряженности магнитного поля. В центре рамки-индикатора укрепляется вектор собственного магнитного момента рамки.

При прохождении тока по большой и малой рамке убедительно демонстрируется ориентирующее действие магнитного поля;

1. Рамка-индикатор всегда устанавливается в одной плоскости с током, создающим магнитное поле так, что ее собственный магнитный момент совпадает с вектором напряженности внешнего магнитного поля.

2. Перенося рамку-индикатор на другую (внешнюю) сторону большой рамы, демонстрируем изменение направления внешнего магнитного поля: рамка-индикатор поворачивается на 180°.

3. Помещая рамку-индикатор в центре большой рамы, демонстрируем направление магнитного поля замкнутого тока. При перемене направления тока в большой раме, рамка-индикатор поворачивается на 180°.

Взаимодействие параллельных токов

Взаимодействие параллельных токов демонстрируется на большой раме, представленной на рис. 6а. Параллельно левой стороне рамы справа и слева от нее подвешиваются станиолевые ленты, которые соединены последовательно. При пропускании тока по лентам и через рамку ток в одной из лент параллелен, в другой — антипараллелен.

Поэтому одна из лент притягивается, другая — отталкивается. Благодаря мощному магнитному полю, создаваемому рамой, одна из лент буквально прилипает к раме (левая сторона рамы), другая лента, отталкиваясь, — вздувается пузырем (рис. 6а и 6б).

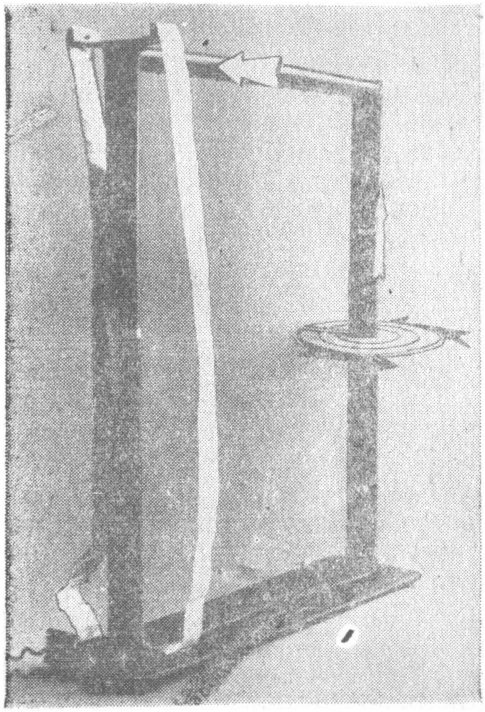


Рис. 6а.

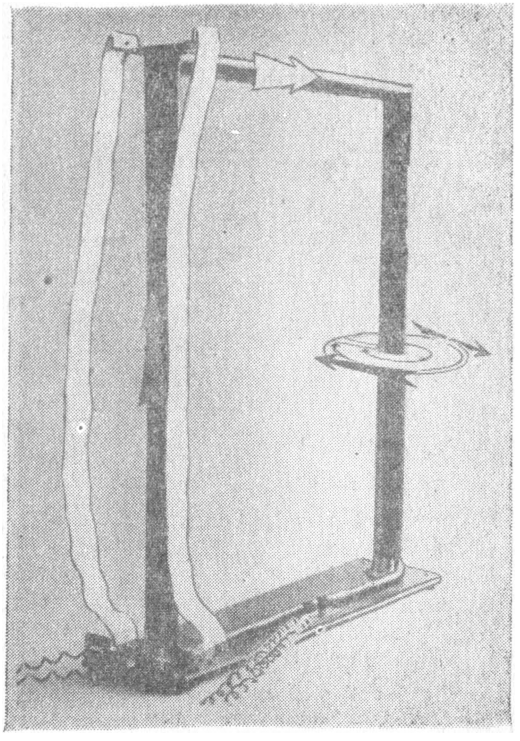


Рис. 6б.

При перемене направления тока в лентах или в раме, силы, действующие на ленты с током, меняются по направлению, что эффективно фиксирует прибор.

Описанные приборы демонстрировались нами в аудитории на 150 человек.

II. КОНСУЛЬТАЦИЯ

Н. П. ГРИФЦОВ

ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ПОЛЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Программой курса теоретической механики в педагогическом институте предусмотрена очень важная и актуальная тема: «Движение материальной точки в поле центральной силы», и, как применение соответствующей теории, вопрос о движении искусственных спутников Земли.

Целью настоящей статьи является некоторое обобщение имеющихся в учебниках и специальной литературе материалов, с тем, чтобы помочь учителям и студентам глубже понять основные закономерности полета спутника.

В статье рассматриваются следующие основные вопросы:

1. Понятие центральной силы и особенности движения материальной точки в поле ее действия.
2. Скорость и ускорение точки в полярных координатах. Дифференциальные уравнения движения точки в полярных координатах.
3. Формула Бине
4. Движение материальной точки в поле Земного тяготения.
5. Необходимые условия запуска искусственного спутника Земли на круговую и эллиптическую орбиты.
6. Определение периода обращения спутника по орбите.

§ 1. ПОНЯТИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИЛЫ И ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ЕЕ ПОЛЕ

Сила, линия действия которой во все время движения точки проходит через неподвижную точку O, называемую центром действия силы или полюсом, называется центральной (рис. 1).

Примером центральной силы является сила притяжения или отталкивания.

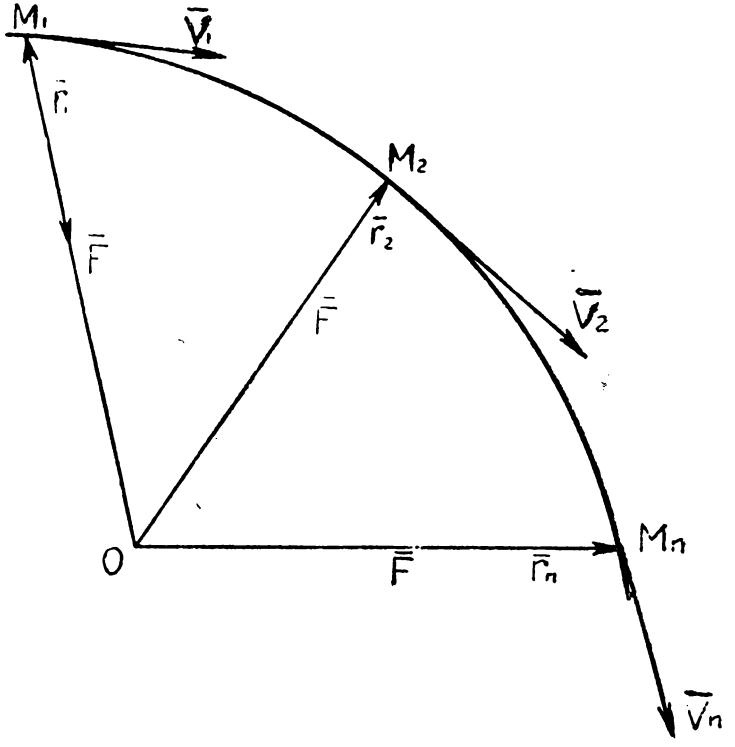


Рис. 1

Пусть под действием центральной силы $\overline{F}$ материальная точка движется по некоторой траектории. Точка O — полюс, M_1, M_2, ... M_n — положения движущейся точки на траектории в последовательные моменты времени (рис. 1.).

Применим теорему об изменении кинетического момента точки относительно полюса 0:

$$\frac{d}{dt}[\bar{r}m\bar{v}] = \bar{M}_0(F)$$

Так как сила центральная, то линия ее действия все время проходит через полюс О и, следовательно, $\bar{M}_0(F) = O$, а это значит, что кинетический момент движущейся точки относительно полюса есть вектор постоянный по величине и направлению во все время ее движения:

$[\bar{r}m\bar{v}] = \bar{C}$ (I), где $\bar{C}$—векторная постоянная, определяемая начальными условиями.

Из равенства (I) следует, что траектория точки представляет собой плоскую кривую. Действительно, плоскость, определяемая векторами $\bar{r}$ и $\bar{v}$, всегда перпендикулярна вектору $\bar{C}$, а последний в процессе движения точки не меняет своего направления.

Таким образом, первой особенностью движения материальной точки под действием центральной силы является то, что она движется по плоской кривой.

Примером такого движения могут служить движения планет Солнечной системы, которые под действием центральной силы притяжения к Солнцу двигаются по плоским орбитам.

Полученному выражению (I) $[\bar{r}m\bar{v}] = \bar{C}$ можно дать наглядное геометрическое истолкование:

Имеем плоскую кривую, по которой движется точка под действием центральной силы F (рис. 2).

Пусть точка за время Δt переместится из положения M в положение M_1. За это время радиус-вектор $\bar{r}$ опишет некоторую площадь $OMAM_1$, которая с точностью до бесконечно малых второго порядка равна площади $\triangle OMM_1$.

Обозначим эту площадь через ΔS.

Из чертежа видно, что $S_{\triangle OMM_1} = \frac{1}{2}\Delta rh$, но

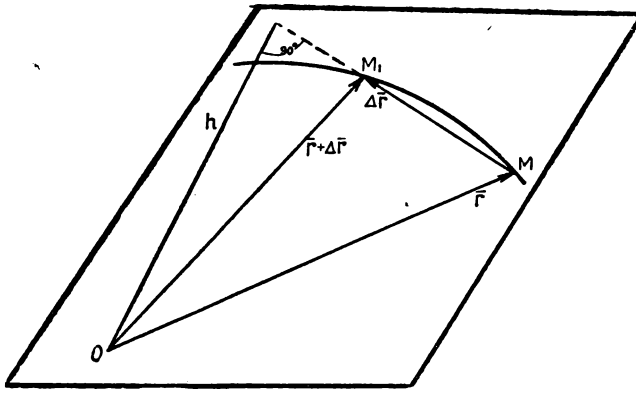


Рис. 2

$h = r \sin(\bar{r}\,\widehat{\Delta r})$ и, следовательно,

$$\Delta S = \frac{1}{2} r \Delta r \sin(\bar{r}\,\widehat{\Delta r}) \text{ или } \Delta \bar{S} = \frac{1}{2} [\bar{r}\,\overline{\Delta r}]. \quad (2)$$

Вектор $\Delta\bar{S}$ называют векторной площадью. Направление его находят по общим правилам определения направления векторного произведения.

Поделим левую и правую часть равенства (2) на Δt и перейдем к пределу при $\Delta t \to 0$:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\bar{r} \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \bar{r}}{\Delta t}\right] = \frac{1}{2} [\bar{r} \bar{v}] \quad \text{или} \quad \frac{dS}{dt} = \frac{1}{2} [\bar{r} \bar{v}]$$

Предел отношения векторной площади, описываемой радиусом-вектором к соответствующему промежутку времени Δt при $\Delta t \to 0$ называется секторной скоростью точки M.

Обозначим секторную скорость $\bar{V}_s$.

Тогда: $$\bar{V}_s = \frac{d\bar{S}}{dt} = \frac{1}{2} [\bar{r}\,\bar{v}]. \quad (3)$$

Сравнивая с выражением (1), можем записать

$$\overline{V}_s = \frac{d\overline{S}}{dt} = \frac{\overline{C}}{2}. \qquad (4)$$

Таким образом, второй особенностью движения точки под действием центральной силы является постоянство ее секторной скорости.

Проинтегрируем равенство (4);

$$\overline{S} = \frac{\overline{C}}{2} t + \overline{C}_0, \qquad (5)$$

где $\overline{C}_0$ — постоянная интегрирования.

Таким образом, площадь, описываемая радиусом-вектором точки, двигающейся под действием центральной силы возрастает со временем линейно.

Равенство (5) называется законом площадей.

Если применим закон площадей к движению планет вокруг Солнца, то получим не что иное, как известный 2-й закон Кеплера.

ПРИМЕЧАНИЕ. В параграфе 2 мы получим для секторной скорости другое, более часто встречающееся выражение.

§ 2. СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ ТОЧКИ В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ В ПОЛЯРНЫХ КООРДИНАТАХ

Поскольку в § 1 мы выяснили, что точка, на которую действует только центральная сила, движется по плоской кривой, то для изучения ее движения целесообразно применить полярные координаты.

Получим выражение скорости и ускорения в полярных координатах, причем, наш вывод, в отличие от общепринятого в учебниках, будет основан на теореме сложения скоростей и теореме Кориолиса, рассматриваемых в теме «Сложное движение точки».

Скорость в полярных координатах

Пусть точка движется по плоской кривой (рис. 3), вектор ее скорости $\overline{V}$.

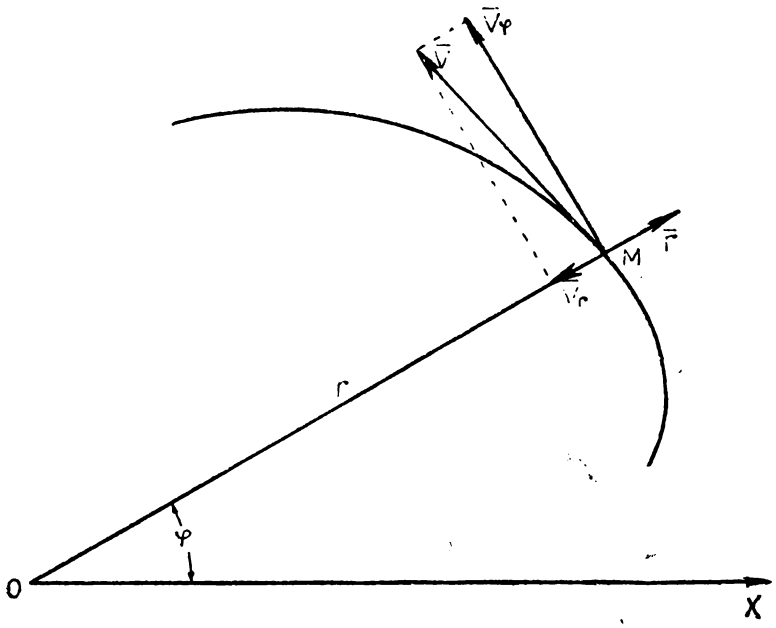


Рис. 3

Выберем два направления, по которым будем находить составляющие скорости и ускорения:

Первое направление, назовем его радиальным,—по полярному радиусу. За положительное направление возьмем направление в сторону увеличения радиуса. Обозначим единичный вектор этого направления $\bar{r}_0$.

Второе направление—перпендикулярное полярному радиусу. Положительное направление возьмем в сторону движения точки.

Обозначим единичный вектор $\bar{\varphi}^0$ и назовем это направление трансверсальным.

Движение точки по траектории относительно центра О можно рассматривать как сложное, состоящее из относительного движения по полярному радиусу с относительной скоростью $\bar{V}_r = \frac{dr}{dt}\bar{r}^0$ и переносного движения вместе с радиусом. Причем мгновенная скорость

переносного движения будет представлять собой скорость движения точки по окружности радиуса r с угловой скоростью $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$.

Следовательно, переносную скорость, которая в данном случае является не чем иным, как трансверсальной скоростью можно выразить следующим образом:

$$\bar{V}_\varphi = r\frac{d\varphi}{dt}\bar{\varphi}^0.$$

Полную скорость точки можно теперь представить как геометрическую сумму двух слагаемых;

$$\bar{V} = \frac{dr}{dt}\bar{r}^0 + r\frac{d\varphi}{dt}\bar{\varphi}^0 \qquad (6)$$

где $\frac{dr}{dt}\bar{r}^0 = \bar{V}_r$ — радиальная скорость (7)

$r\frac{d\varphi}{dt}\bar{\varphi}^0 = \bar{V}_\varphi$ — трансверсальная скорость (8)

Ясно, что $\bar{V}_r \perp \bar{V}_\varphi$.

Воспользуемся полученным выражением трансверсальной составляющей скорости для преобразования формулы секторной скорости (3):

$$\bar{V}_s = \frac{1}{2}[\bar{r}\bar{V}] \quad \text{или} \quad V_s = \frac{1}{2} rV \sin(\widehat{\bar{r}\bar{V}})$$

Из рис. 3 видно, что $V \sin(\widehat{\bar{r}\bar{V}}) = V_\varphi$

и, следовательно, заменяя $V \sin(\widehat{\bar{r}\bar{V}})$ значением $V_\varphi =$

$= r\frac{d\varphi}{dt}$, получим: $V_s = \frac{1}{2} r^2\frac{d\varphi}{dt}$ или $r^2\frac{d\varphi}{dt} = C$, (9)

где C — постоянная, равная удвоенной секторной скорости.

Выражение (9) часто называют интегралом площадей.

Ускорение в полярных координатах

Сделаем чертеж, аналогичный рис. 3 (рис. 4).

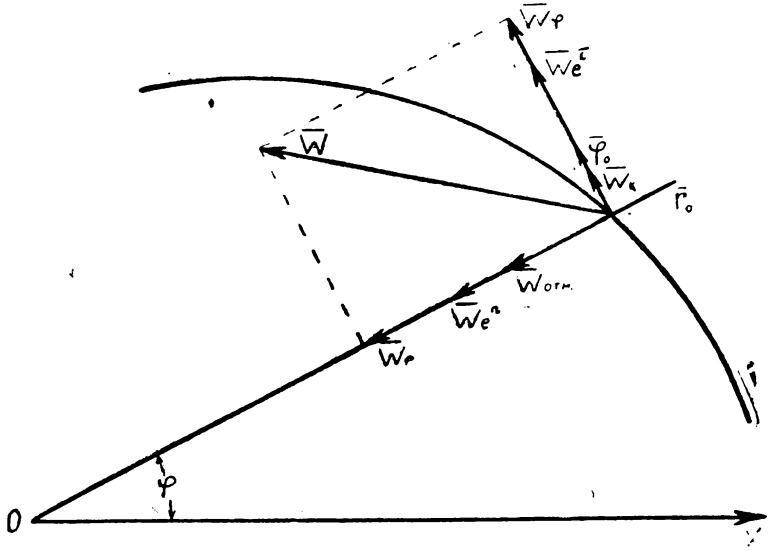


Рис. 4

Рассматривая движение точки как сложное, запишем теорему Кориолиса:

$$\bar{W} = \bar{W}_r + \bar{W}_e + \bar{W}_к$$

$\bar{W}_r$ — относительное ускорение точки (за подвижную систему отсчета так же, как и ранее, примем полярный радиус.

$$\text{Тогда } \bar{W}_r = \frac{d^2r}{dt^2}\bar{r}^0, \qquad (10)$$

причем направление $\bar{W}_r$ будет определять знак $\frac{d^2r}{dt^2}$,

$\bar{W}_e$ — переносное ускорение, состоящее из нормального и тангенцального ускорений точки в ее движении по окружности радиуса r.

Следовательно,

$$\bar{W}_e = \bar{W}_e^n + \bar{W}_e^\tau = -r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \bar{r}^\circ + r\frac{d^2\varphi}{dt^2}\bar{\varphi}^\circ \qquad (11)$$

Причем $\overline{W}_e{}^n$ будет всегда иметь знак—, так как оно направлено к полюсу, а знак $\overline{W}_e{}^\tau$ будет зависеть от знака $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$, т. е. от характера движения точки.

Наконец, ускорение Кориолиса, как известно, выражается формулой:

$$\bar{W}_к = 2\left[\bar{\omega}\,\bar{V}_r\right] \quad \text{или} \quad W_к = 2\frac{d\varphi}{dt}\frac{dr}{dt}\,Sin(\widehat{\bar{\omega}\bar{V}_r}), \text{ но } Sin(\widehat{\bar{\omega}\bar{V}_r}) = 1$$

и $$W_к = 2\frac{d\varphi}{dt}\frac{dr}{dt}$$ (по модулю).

Направлено $\overline{W}_к$ будет по касательной к окружности радиуса r, в сторону, определяемую знаком $\frac{d\varphi}{dt}\frac{dr}{dt}$, т. е. по направлению единичного вектора $\bar{\varphi}^\circ$ или в противоположную сторону.

Сгруппировав составляющие ускорения по трансверсальному и радиальному направлению, получим:

$$\bar{W}_\varphi = \left(r\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\frac{d\varphi}{dt}\frac{dr}{dt}\right)\bar{\varphi}^\circ \qquad (12)$$

$$\bar{W}_r = \left\{\frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\right\}\bar{r}^\circ \qquad (13)$$

По полученным составляющим можно найти модуль полного ускорения и его направление (методы нахождения общеизвестны и мы их опускаем).

Дифференциальные уравнения движения точки в полярных координатах

Запишем 2-ю аксиому динамики для движения материальной точки в векторной форме:

$$m\overline{W} = \overline{F} \qquad (14)$$

Проектируя это уравнение на трансверсальное и радиальное направления, получим искомые дифференциальные уравнения: $m\,\overline{W}_{\varphi} = \overline{F}_{\varphi}$ (15),

$$m\,\overline{W}_{r} = \overline{F}_{r} \quad (16),$$

где значения $\overline{W}_{\varphi}$ и $\overline{W}_{r}$ определяются формулами (12), (13).

Поскольку нас интересует движение точки под действием центральной силы, то, применив полученные уравнения к рассматриваемому случаю, видим, что $\overline{F}_{\varphi} = 0$ и, следовательно, правая часть уравнения (15) обращается в нуль, а индекс у $\overline{F}_{r}$ в уравнении (16) можем опустить, так как центральная сила полностью проектируется на радиальное направление. Причем оба уравнения можем рассматривать как алгебраические, если направление силы F будем учитывать знаком + или —.

Ясно, что для силы отталкивания сила F будет иметь знак +, так как ее направление совпадает с $\overline{r}^{0}$, для силы притяжения—знак —.

Таким образом, получаем 2 уравнения:

$$m\left(r\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\frac{d\varphi}{dt}\frac{dr}{dt}\right) = 0 \quad (17) \qquad m\left\{\frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\right\} = \pm F \quad (18)$$

Интегрируя полученные дифференциальные уравнения (17) и (18), можно получить уравнения движения точки в полярных координатах, а исключив время,— уравнение траектории.

Однако этот путь громоздкий и неудобный.

Ученым Бине был предложен другой путь, более простой и изящный.

Он предложил преобразовать полученные уравнения таким образом, чтобы, исключив время, получить дифференциальное уравнение, связывающее непосредственно **r и φ.**

§ 3. ФОРМУЛА БИНЕ

Интегрируя уравнение (17), можно снова получить интеграл площадей. Действительно:

так как $\frac{d\varphi}{dt}=\omega$, то уравнение (17) можно представить в виде:

$$m\left(r\frac{d\omega}{dt}+2\omega\frac{dr}{dt}\right)=0 \quad \text{или} \quad \frac{d\omega}{\omega}+2\frac{dr}{r}=0. \qquad (19)$$

Интегрируя уравнение (19), получим:

$$r^2\omega=C \quad \text{или} \quad r^2\frac{d\varphi}{dt}=C \qquad (20)$$

т. е. уже известный нам интеграл площадей, где $C=2V_s$

Используя равенство (20) и уравнение (18), получим так называемую формулу Бине.

В этих целях займемся преобразованием уравнения (18).

Введем новую переменную $U=\frac{1}{r}$ (21) и выразим

$$\frac{d^2r}{dt^2} \text{ и } r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \text{ через } r,\ \varphi \text{ и } C.$$

Дифференцируя (21) по φ как сложную функцию, имеем:

$$\frac{du}{d\varphi}=\frac{du}{dr}\frac{dr}{d\varphi}, \quad \text{отсюда} \quad \frac{dr}{d\varphi}=\frac{\frac{du}{d\varphi}}{\frac{du}{dr}}, \quad \text{но} \quad \frac{du}{dr}=-\frac{1}{r^2}$$

и следовательно:

$$\frac{dr}{d\varphi}=-r^2\frac{du}{d\varphi}. \qquad (22)$$

Далее дифференцируем r по t, рассматривая r как сложную функцию t: $\frac{dr}{dt}=\frac{dr}{d\varphi}\frac{d\varphi}{dt}$.

Подставляя сюда значения $\frac{dr}{d\varphi}$ из (22) и $\frac{d\varphi}{dt}$ из (20), получим:

$$\frac{dr}{dt} = -r^2 \frac{du}{d\varphi} \frac{c}{r^2} \quad \text{или} \quad \frac{dr}{dt} = -c \frac{du}{d\varphi} \qquad (23)$$

Найдем $\frac{d^2r}{dt^2}$: $\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{d}{d\varphi}\left(\frac{dr}{dt}\right)\frac{d\varphi}{dt}$,

подставляя значения $\frac{dr}{dt}$ из (23) и $\frac{d\varphi}{dt}$ из (20), получаем:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -c\frac{d^2u}{d\varphi^2}\frac{c}{r^2} \quad \text{или, учитывая, что}$$

$$\frac{1}{r^2} = u^2 \qquad \frac{d^2r}{dt^2} = c^2u^2\frac{d^2u}{d\varphi^2} \qquad (24)$$

Заменив теперь слагаемые, стоящие в скобках уравнения (18), их значениями из выражений (24) и (20), получаем:

$$m\left(-c^2u^2\frac{d^2u}{d\varphi^2} + \frac{1}{u}c^2u^4\right) = \pm F \quad \text{или} \quad mc^2u^2\left(\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u\right) = \pm F \qquad (25),$$

где $U = \frac{1}{r}$, а знак F зависит от направления силы, как это было указано на странице 100.

Полученная формула (25) и носит название формулы Бине (точнее—второй формулы Бине).

Пользуясь формулой Бине, можно решать прямую и обратную задачу динамики для материальной точки, двигающейся в поле центральной силы. В частности, из законов Кеплера (т. е. по известным законам движения) может быть получен закон Всемирного тяготения Ньютона.

Соответствующий вывод довольно простой, имеется во всех учебниках и мы его опускаем.

2-ю, или обратную задачу, динамики, как известно,

решить значительно труднее. Однако если известно, что центральная сила зависит только от расстояния до полюса, то и эта задача решается довольно просто.

В качестве примера рассмотрим движение материальной точки в поле тяготения Земли—наиболее актуальный вопрос в связи с запуском искусственных спутников Земли и Солнца.

§ 4. ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В ПОЛЕ ЗЕМНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Эта задача возникает при изучении движения ракет дальнего действия и искусственных спутников Земли, а также при рассмотрении проблем космических полетов. В этих случаях дальности и высоты полета уже сравнимы с радиусом Земли, а следовательно, необходимо учитывать изменение величины и направления силы притяжения с расстоянием. Будем рассматривать тело как материальную точку массы m, значительно меньшую массы Земли, Землю считать неподвижной и пренебрежем ее несферичностью, а также сопротивлением воздуха (движение тела происходит на высотах, где плотность воздуха очень мала).

При данных условиях можно считать, что на тело действует только центральная сила притяжения, направленная к центру Земли и определяемая из закона Всемирного тяготения:

$$F = \gamma \frac{m M_3}{r^2} \qquad (26)$$

Преобразуем формулу (26) к более удобному для нашей задачи виду: если тело находилось бы на поверхности Земли, то $F = mg_0$, где g_0 — ускорение силы тяжести на поверхности Земли, а $r = R$, где R — средний радиус Земли.

Следовательно, для рассматриваемого случая можно записать:

$$mg_0 = \gamma \frac{m M_3}{R^2} \qquad (27),$$

отсюда выразим значение $\gamma M_3 = g_0 R^2$ и подставим в формулу (26):

$$F = \frac{mg_0 R^2}{r^2} \qquad (28)$$

или заменив $\frac{1}{r^2}$ через U^2, получим окончательную формулу для силы притяжения:

$$F = mg_0 u^2 R^2 \qquad (29)$$

Далее, предположим, что тело каким-либо образом поднято на высоту H над поверхностью Земли и ему сообщена начальная скорость $\overline{V_0}$ под углом α_0 к горизонту, после чего оно находится только под действием силы притяжения (29).

Изучением движения тела с этого момента мы и займемся в данном параграфе.

Сделаем соответствующий чертеж (рис. 5).

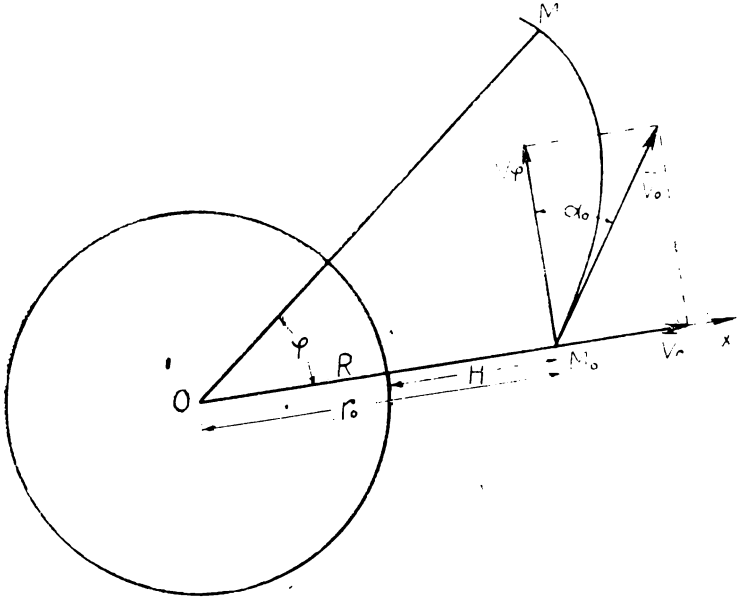


Рис. 5

M_0 — точка, в которой телу сообщили скорость $\overline{V_0}$ под углом α_0 к горизонту;

R — ра́диус Земли;

H — высота точки M_0 над поверхностью Земли;

M — текущее положение движущейся точки на траектории.

Для упрощения дальнейших записей введем обозначение: $r_0 = R + H$ (30).

Так как на точку действует центральная сила притяжения, то траектория будет плоской кривой и можем ввести полярные координаты.

Полюс O расположим в центре Земли, полярную ось направим по линии OM_0.

Применяя к рассматриваемому случаю формулу Бине и учитывая, что сила $F = -mg_0U^2R^2$, получаем: $-mc^2u^2\left(\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u\right) = -mg_0u^2R^2$, или сделав некоторые преобразования:

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u = \frac{g_0R^2}{c^2} \qquad (31)$$

Определим постоянную C, используя начальные условия:

при $t = 0$ $\quad V = V_0$

$\qquad\qquad\quad r = r_0$

Вспомним интеграл площадей (20): $r^2\frac{d\varphi}{dt} = C$,

перепишем это выражение иначе:

$$rr\frac{d\varphi}{dt} = C, \text{ но } r\frac{d\varphi}{dt} = V_\varphi. \qquad (32)$$

Из рис. 5 видно, что при

$$t = 0,\ V\varphi = V_0\cos\alpha_0 \text{ и } r = r_0. \qquad (33)$$

Подставляя (33) в (32), получаем, что

$$r_0V_0\cos\alpha_0 = C. \qquad (34)$$

Заменив в (31) постоянную C ее значением из (34), получаем искомое дифференциальное уравнение движения точки под действием силы притяжения к центру Земли:

$$\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u = \frac{g_0 R^2}{\xi^2 V_r^2 \cos\alpha_0} \qquad (35)$$

Решив уравнение (35), получим уравнение траектории движения точки.

Как известно из теории дифференциальных уравнений, уравнение (35) является линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Его общее решение имеет вид: $U = y + Z$ (36), где y—общее решение однородного уравнения $\frac{d^2u}{d\varphi^2} + u = 0$ (37), а Z—частное решение неоднородного уравнения (35).

Следуя Эйлеру, будем искать решение уравнения (37) в виде: $y = e^{k\varphi}$, где k — некоторое постоянное число, которое нужно выбрать так, чтобы функция $y = e^{k\varphi}$ (38) обращала уравнение (37) в тождество. Подставляя (38) в (37) и сокращая на $e^{k\varphi}$, получим так называемое характеристическое уравнение $k^2+1=0$ (39), из которого определяем значение постоянной k.

$$k_1 = i \text{ и } k_2 = -i$$

Следовательно, частные решения уравнения (37) будут такие: $y_1 = e^{i\varphi}$ и $y_2 = e^{-i\varphi}$, а общее решение будет представлять собой линейную комбинацию этих частных решений, т. е.: $y = C_1^1 e^{i\varphi} + C_2^1 e^{i\varphi}$ (40), где C_1^1 и C_2^1 произвольные постоянные.

В выражении (40) избавимся от мнимых величин, применив известные формулы Эйлера:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi \quad \text{и} \quad e^{-i\varphi} = \cos\varphi - i\sin\varphi \quad (41$$

Применяя эти формулы (41) к общему решению (40), получим:

$$y = C_1'(\cos\varphi + i\sin\varphi) + C_2'(\cos\varphi - i\sin\varphi) \text{ или } y = (C_1' + C_2')\cos\varphi +$$

$$+ i(C_1' - C_2')\sin\varphi$$

Введем новые постоянные C_1 и C_2, определяемые равенствами: $C_1 = C_1^1 + C_2^1$ и $C_2 = i(C_1^1 - C_2^1)$ (42). Тогда с учетом равенств (42) получим общее решение уравнения (37) в виде:

$$y = C_1\cos\varphi + C_2\sin\varphi \qquad (43)$$

Наконец, полученное выражение можно привести и к другому, часто применяемому виду, который удобнее для нашей задачи.

Для этого введем новые постоянные A и B,определяемые равенствами A $\mathrm{Cos}\beta = C_1$ и A $\mathrm{Sin}\beta = C_2$.

Подставляя значения C_1 и C_2 в (43), получаем:

$$y = A\cos\beta\cos\varphi + A\sin\beta\sin\varphi \text{ или } y = A\cos(\varphi - \beta \qquad 44$$

Частным решением неоднородного уравнения (35), как нетрудно убедиться путем подстановки, является его правая часть, т. е.

$$z = \frac{q_0 R^2}{z^2 V_0^2 \cos^2\alpha_0} \qquad (45)$$

Следовательно, общее решение уравнения (35) будет иметь вид:

$$u = A\cos(\varphi - \beta) + \frac{q_0 R^2}{z^2 V_0^2 \cos^2\alpha_0} \qquad (46)$$

где A и β — произвольные постоянные.

Преобразуем (46) к более удобному для анализа виду.

Обозначим; $p = \frac{r_0^2 V_0^2 \cos^2 \alpha_0}{g_0 R^2}$. (47)

Тогда (46) можно записать в виде: $U = A\cos(\varphi - \beta) + \frac{1}{p}$, отсюда $U = \frac{1 + AP\cos(\varphi - \beta)}{P}$ или, если обозначим $AP = e$, где e новая произвольная постоянная, зависящая от начальных условий:

$$U = \frac{1 + e\cos(\varphi - \beta)}{P}. \quad (48)$$

Наконец, перейдя от U к r, получим

$$r = \frac{P}{1 + e\cos(\varphi - \beta)} \quad (49)$$

Из аналитической геометрии известно, что уравнение (49) представляет собой уравнение конического сечения (окружность, эллипс, парабола или гипербола) в полярных координатах. Причем полюс O находится в одном из фокусов, P — фокальный параметр, а e — эксцентриситет.

Последний определяет вид кривой конического сечения:

$e = 0$ — окружность;

$e < 1$ — эллипс;

$e = 1$ — парабола;

$e > 1$ — гипербола.

Следовательно, материальная точка, находящаяся в поле тяготения Земли, может двигаться по одной из этих траекторий, причем форма орбиты будет определяться начальными условиями: V_0, α_0, r_0, так как от них зависит величина эксцентриситета e.

Геометрический же смысл постоянной β виден из того, что при $\varphi = \beta$ величина r имеет экстремум, а значит, угол β определяет положение оси симметрии траектории (ось AP на рис. 6) по отношению к выбранной нами полярной оси, проходящей через точку вылета M_0.

Определим постоянные β и e, воспользовавшись начальными условиями:

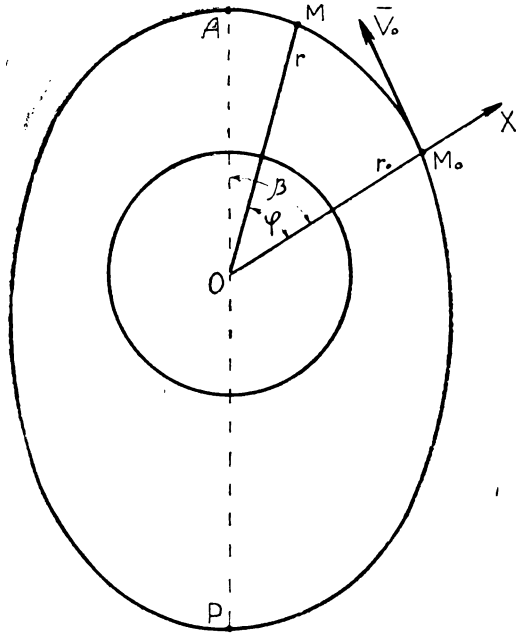


Рис. 6

Запишем уравнение (48); $U = \dfrac{1 + e\,\mathrm{Cos}\,(\varphi - \beta)}{P}$

при $t = 0$ $U = U_0$, где $U_0 = \dfrac{1}{r_0}$ и $\varphi = 0$.

Отсюда получаем первое уравнение для определения β и e.

$$U_0 p = 1 + e\cos\beta \quad \text{или} \quad e\cos\beta = U_0 p \qquad (50)$$

Второе уравнение получим, исходя из следующих соображений:

1. Продифференцируем (48) по φ:

$$\frac{dU}{d\varphi} = -\frac{e}{p}\,\mathrm{Sin}\,(\varphi - \beta)\,. \qquad (51)$$

2. С другой стороны, найдем $\frac{dU}{d\varphi}$, рассматривая U как сложную функцию φ.

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dU}{dz}\frac{dz}{d\varphi} \quad \text{или} \quad \frac{dU}{d\varphi} = -\frac{1}{z^2}\frac{dz}{d\varphi} \qquad (52)$$

3. Вспомним выражение для радиальной и трансверсальной составляющих скорости:

$$V_z = \frac{dz}{dt} \quad \text{и} \quad V_\varphi = z\frac{d\varphi}{dt}$$

Возьмем отношение: $\frac{V_r}{V_\varphi} = \frac{1}{r}\frac{dr}{d\varphi}$ и подставим найденное отсюда значение $\frac{dr}{d\varphi}$ в (52) $\frac{dU}{d\varphi} = -\frac{1}{r}\frac{V_r}{V_\varphi}$ (53)

4. Подставим (53) в (51):

$$-\frac{1}{z}\frac{V_z}{V_\varphi} = -\frac{e}{p}\sin(\varphi-\beta) \qquad (54)$$

5. Из рис. 5 видно, что в момент

$$t=0: \frac{V_r}{V_\varphi} = \operatorname{tg}\alpha_0,\ r = r_0,\ \varphi = 0.$$

Учитывая это, можем записать:

или $$\frac{1}{z_0}\operatorname{tg}\alpha_0 = -\frac{e}{p}\sin\beta \quad \text{или} \quad e\sin\beta = p\operatorname{tg}\alpha_0 \qquad (55)$$

Воспользовавшись уравнениями (50) и (55), можем определить постоянные β и e:

а) Поделим (55) на (50): $\operatorname{tg}\beta = \frac{P U_0 \operatorname{tg}\alpha_0}{U_0 P - 1}$,

или $$\operatorname{tg}\beta = \frac{V_0^2 z_0^2 \sin 2\alpha_0}{2(g_0 R^2 - V_0^2 z_0^2 \cos^2\alpha_0)} \qquad (56)$$

б) Возведем каждое уравнение в квадрат и сложим:

$$e = \sqrt{1 - 2u_0 p + u_0^2 p^2 + u_0^2 p^2 \frac{\cdots}{\cdots}} \quad \text{или} \quad e = \sqrt{1 - 2u_0 p + u_0^2 p^2 (1 + \cdots)}$$

сделав еще некоторые преобразования, получим выражение для e:

$$e = \sqrt{1 + u_0 p \left(\frac{u_0 p}{\cos^2 \alpha_0} - 2 \right)} \quad (57) \quad \text{где} \quad p = \frac{z^2 V_0^2 \cos^2 \alpha_0}{g_0 R^2} \quad \text{и} \quad u_0 = \frac{1}{r_0} = \frac{g_0}{\cdots}$$

Применим (57) для нахождения зависимости формы орбиты от начальных условий.

1. Траектория — окружность (e = 0).

В этом случае из (57) следует:

$$+ u_0 p \left(\frac{u_0 p}{\cos^2 \alpha_0} - 2 \right) = 0$$

$$\text{или} \quad P^2 - 2 \frac{\cos^2 \alpha_0}{U_0} P + \frac{\cos^2 \alpha_0}{U_0^2} = 0. \qquad (58)$$

Решаем уравнение, находя значения P.

$$P = \frac{\cos^2 \alpha_0}{U_0} \pm \sqrt{\frac{\cos^4 \alpha_0}{U_0^2} - \frac{\cos^2 \alpha_0}{U_0^2}} \quad \text{или} \quad P = \frac{\cos^2 \alpha_0}{U_0} + \frac{\cos \alpha_0}{U_0} \sqrt{\cos^2 \alpha_0 - 1}$$

Из (59) видно, что для того, чтобы P имело действительное значение, необходимо условие:

$$\cos^2 \alpha_0 - 1 \geqslant 0 \quad \text{или} \quad |\cos \alpha_0| \geqslant 1.$$

Ясно, что возможен только случай $|\cos \alpha_0| = 1$.

Следовательно, чтобы точка двигалась по круговой орбите угол бросания α_0 должен быть равен 0 или π (60).

Найдем значение V_0: учитывая (60), из (59) следует, что $P = \frac{\cos^2 \alpha_0}{U_0}$ или, $\frac{r^2 V_0^2 \cos^2 \alpha_0}{g_0 R^2} = r_0 \cos^2 \alpha_0$.

Отсюда: $V_0 = \sqrt{\frac{g_0 R^2}{r_0}}$ или $V_0 = \sqrt{\frac{g_0 R^2}{R + h}}$

Вывод.

Чтобы материальная точка, находящаяся только под действием силы притяжения к Земле, двигалась по круговой орбите радиуса r_0 с центром в центре Земли, необходимо выполнение двух условий:

а) угол α_0, который составляет V_0 с горизонтом, должен быть равен 0 или π.

б) Начальная скорость V_0 определяется формулой:

$$V_0 = \sqrt{\frac{g_0 R^2}{R+H}} \qquad (62)$$

Эта скорость называется круговой скоростью. Ясно, что с увеличением высоты H круговая скорость уменьшается.

У поверхности Земли круговая скорость $V_0 = \sqrt{g_0 R}$ (63) и численно равна 7,9 км/сек.

Эту скорость принято называть 1-й космической скоростью.

2. Траектория — эллипс

В этом случае $e < 1$ и как следует из (57)

$\frac{U_0 P}{\mathrm{Cos}^2\alpha_1} - 2 < 0$ (64), так как U_0 и P всегда > 0.

Подставляя в (64) значения P и U_0, получим:

$$\frac{r_0^2 V_0^2 \mathrm{Cos}^2\alpha_0}{r_0 \mathrm{Cos}^2\alpha_0 g_0 R^2} < 2,$$

откуда $V_0 < \sqrt{\frac{2 g_0 R^2}{r_0}}$, или $V_0 < \sqrt{\frac{2 g_0 R^2}{R+H}}$ (65)

3. Траектория — парабола

Для параболы $e = 1$, и следовательно,

$$\frac{U_0 P}{\mathrm{Cos}^2\alpha_0} - 2 = 0, \quad \text{откуда } V_0 = \sqrt{\frac{2 g_0 R^2}{R+H}} \qquad (66)$$

Это так называемая параболическая скорость, которую чаще называют второй космической, при $H=0$, так как если сообщить телу эту скорость, то оно будет двигаться по параболе, и, следовательно, выйдет за пределы тяготения Земли.

У поверхности Земли 2-я космическая скорость равна 11,2 $\frac{км}{сек}$, а с поднятием на высоту H уменьшается согласно формуле (66).

4. Траектория — гипербола

Учитывая, что для гиперболы $e>1$, и используя те же уравнения, что и в предыдущих случаях, получим:

$$V_0 > \sqrt{\frac{2g_0R^2}{R+H}} \qquad (67)$$

§ 5. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ЗАПУСКА ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ

Искусственный спутник Земли должен двигаться по замкнутой орбите, т. е. либо по круговой, либо по эллиптической.

Условия запуска на круговую орбиту нами рассмотрены в 1 случае. Соответствующая начальная скорость называется круговой или первой космической скоростью. Подчеркнем еще раз, что для вывода спутника на круговую орбиту начальная скорость обязательно должна быть направлена горизонтально, независимо от высоты H.

Рассмотрим условия запуска спутника на эллиптическую орбиту.

Одним из условий, видимо, будет $V_0 < \sqrt{\frac{2g_0R^2}{R+H}}$, но этого условия еще недостаточно. Действительно, в своем движении по эллиптической орбите, спутник должен находиться на расстоянии $r \geqslant R$ (68) от центра Земли, в котором находится и фокус эллиптической орбиты, так как иначе он упадет на Землю.

Из уравнения (49) найдем выражение для минимального расстояния спутника от полюса O: очевидно, $r = r_{min}$

при $\cos(\varphi-\beta)=1$ отсюда $\frac{P}{1+e} \geqslant R$ (69)

Следовательно, для движения спутника необходимо: $P \geqslant R + eR$, отсюда $\frac{P-R}{R} \geqslant e$ или $\frac{(P-R)^2}{R^2} \geqslant e^2$. (70)

Преобразуем (70) и подставим выражение P^2 из (57):

$$\frac{p^2}{R^2} - 2\frac{p}{R} + 1 \geqslant 1 + U_0 p\left(\frac{U_0 p}{\cos^2\alpha_0} - 2\right) \text{ или}$$

$$p^2\left(\frac{1}{R^2} - \frac{U_0^2}{\cos^2\alpha_0}\right) - 2p\left(\frac{1}{R} - U_0\right) \geqslant 0 \quad (71)$$

Отсюда: $\frac{P}{R^2} - \frac{pU_0^2}{\cos^2\alpha_0} - \frac{2}{R} + 2U_0 \geqslant 0$ или

подставив значения P и U_0:

$$\frac{r_0^2 V_0^2 \cos^2\alpha_0}{g_0 R^4} - \frac{r_0^2 V_0^2 \cos^2\alpha_0}{g_0^2 R^2 \cos^2\alpha_0 r_0} - \frac{2}{R} + \frac{2}{r_0} \geqslant 0$$

После несложных алгебраических преобразований получаем:

$$V_0 \geqslant \sqrt{\frac{2g_0 R^3 (r_0 - R)}{r_0 (r_0^2 \cos^2\alpha_0 - R^2)}}. \quad (72)$$

Причем, для того, чтобы V_0 имела действительное значение, необходимо выполнение следующего условия:

$$r_0^2 \cos^2\alpha_0 - R^2 \geqslant 0 \quad \text{или} \quad \cos\alpha_0 \geqslant \frac{R}{R+H} \quad (73)$$

Из (72) получаем нижнюю границу начальной скорости V_0, которую необходимо сообщить спутнику. Верхняя же граница определяется формулой (65).

Вывод. Для того, чтобы тело стало искусственным спутником Земли, необходимо выполнение следующих условий:

1. Начальная скорость должна лежать в пределах:

$$\sqrt{\frac{2g_0R^3(r_0-R)}{r_0(r_0^2\cos^2\alpha_0-R^2)}} \leqslant V_0 < \sqrt{\frac{2g_0R^2}{r_0}} \quad (74) \quad \text{где } r_0=R+H$$

2. Угол, который составляет V_0 с горизонтом, должен удовлетворять условию (73):

$$|\cos\alpha| \geqslant \frac{R}{R+H}.$$

При уменьшении H, границы начальной скорости изменяются и в пределе, когда $H \to 0$, т. е. спутник запускается с поверхности Земли, скорость будет лежать в пределах:

$$\sqrt{g_0R} \leqslant V_0 < \sqrt{2g_0R} \quad (75)$$

Данное выражение легко получается из (74) при $r_0 \to R$ и $\cos\alpha_0 \to 1$.

Однако в этом случае, как это следует из (73), скорость должна быть направлена горизонтально.

Практически такой запуск спутника невозможен, так как при сообщении ему у поверхности Земли горизонтальной скорости порядка 7,9—11,2 км/сек. он сгорит в плотных слоях атмосферы.

Обычно выведение спутника на орбиту производится следующим образом:

Старт ракеты-носителя осуществляется вертикально, с тем, чтобы быстрее пройти плотные слои атмосферы (рис. 7).

Затем, после сравнительно небольшого участка вертикального подъема, ракета постепенно поворачивается вокруг поперечной оси и траектория искривляется.

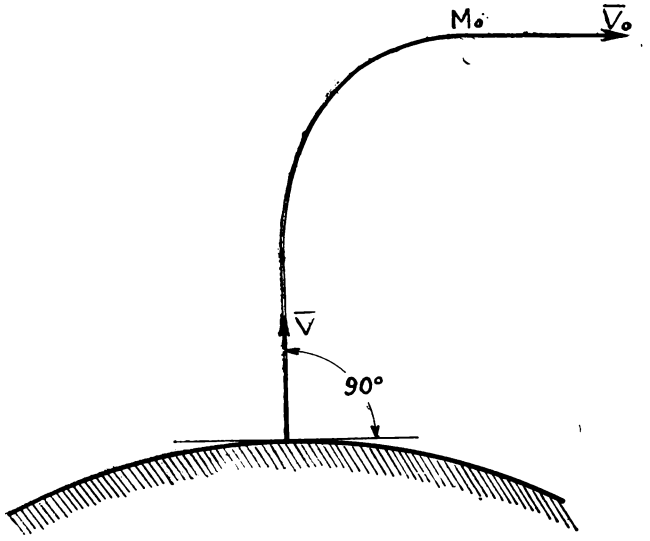


Рис. 7

Выбирая соответствующую программу разворота по времени, можно получить требуемые значения H и α_0. При выведении на орбиту спутников обычно $\alpha_0 \approx 0$. При запуске же космических кораблей за пределы поля тяготения Земли, угол α_0 определяется условиями пуска (время, расположение планет, широта места запуска и т. д.).

§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ОБРАЩЕНИЯ СПУТНИКА ПО ОРБИТЕ

Если спутник движется по круговой орбите, то разделив длину окружности орбиты на его круговую скорость, мы найдем период T.

Достаточно просто определяется период обращения и в случае эллиптической орбиты.

Применяя 2-й закон Кеплера, можно записать:

$$T = \frac{\pi ab}{V_s}, \qquad (76)$$

где a и b — полуоси эллипса,

πab — площадь эллипса,

Vs — секторная скорость.

Преобразуем полученную формулу к виду, удобному для вычислений. Из аналитической геометрии известно, что параметр эллипса

$$p = \frac{b^2}{a} \quad \text{отсюда} \quad b = \sqrt{pa}$$

Значения $V_s = \frac{1}{2} v_0 V_0 \cos\alpha_0$ и $p = \frac{r_0^2 V_0^2 \cos^2\alpha_0}{g_0 R^2}$

нами найдены в § 4 (формулы 34 и 47).

Подставляя значения b, Vs и P в (76), получим:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{g_0 R^2}}$$

В начале § 4 было показано, что $g_0 R^2 = M_3 \gamma$.

Так как это произведение для Земли постоянно, то его часто называют постоянной поля тяготения и обозначают буквой К.

С учетом этого получаем окончательную формулу для определения периода:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{K}} \qquad (77)$$

Отметим, что полученная формула справедлива для периода обращения спутников, двигающихся вокруг любого небесного тела как центрального. Различие будет лишь в величине К.

Например, для Земли $K_3 = \gamma M_3 = 3{,}986 \cdot 10^5$ км^3/сек^2, для Луны $K_л = \gamma M_л = 4830$ км^3/сек^2.

Величину большой полуоси a можно определить, зная наибольшее ($H_{макс.}$) и наименьшее ($H_{мин.}$) удаление спутника от поверхности центрального тела и его радиус R.

Из рис. 6 видно, что $a = \frac{H_{макс.} + H_{мин.} + 2R}{2}$, т. е.

большая полуось орбиты a равна среднему расстоянию спутника от центра Земли.

Формулу (77) можно применять и для вычисления периода обращения спутника по круговой орбите. Действительно, в этом случае $a = r$ и, следовательно,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{K}}. \qquad (78)$$

Отметим, что полученная нами формула (77), есть не что иное, как 3-й закон Кеплера применительно к движению спутника, так как из нее непосредственно следует, что

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{K} \qquad (79), \qquad \text{т. е.}$$

отношение квадрата периода обращения спутника вокруг центрального тела (у Кеплера — планет вокруг Солнца) к кубу большой полуоси есть величина постоянная (для данного центрального тела).

Следовательно, если нам известен период обращения какого-либо спутника вокруг Земли и большая полуось орбиты, то для определения периода любого другого спутника достаточно знать большую полуось его орбиты.

Искомый перод T_2 найдется из соотношения:

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}.$$

В заключение отметим, что мы рассмотрели лишь элементарную теорию движения искусственного спутника Земли.

Более точные расчеты, учитывающие влияние многих факторов (вращение Земли, действие Луны, Солнца, несферичность Земли и т. п.) достаточно сложны и их можно найти в специальной литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Александров и Р. Е. Федоров. «Советские спутники и космические корабли». М., изд-во АН СССР, 1961.

2. А. А. Штернфельд. «Искусственные спутники». М., Гос. изд-во тех.-теор литературы, 1958.

3. С. Э. Хайкин. «Физические основы механики». М., Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962.

4. С. М. Тарг. «Краткий курс теоретической механики». М., Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963.

5. Г. Н. Савин, Н. А. Кильчевский, Т. В. Путята. «Теоретическая механика». Киев, Гос. изд-во тех. лит-ры УССР, 1963.

III. ПРОГРАММИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ

В. А. КАТОРГИН, Ц. М. РАБИНОВИЧ, О. Н. МУРАДОВА, М. Г. ГИРИНА, В. В. ЖЕЛАТЕЛЕВА, В. П. ГОЛОВИХИНА, В. Ф. ЛЫСОВ, Н. П. ГРИФЦОВ

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭКЗАМЕНАТОРОВ

Первый экзаменатор был изготовлен на кафедре физики Ульяновского педагогического института в начале 1963/64 учебного года. Эта машина была построена по принципу выбора верного ответа. Программа составлена из 10 вопросов. На каждый вопрос предлагалось 10 ответов, из которых один — верный.

Машина с успехом демонстрировалась на студенческих вечерах, в школе юных физиков. Тут же была предпринята попытка использовать ее в учебном процессе для проверки подготовленности студентов к лабораторным работам по радиотехнике.

Первый же опыт показал, что машина страдает рядом недостатков. Десять ответов на каждый вопрос — слишком большой и ненужный выбор. Не удовлетворяла нас и схема прибора. Мы решили ее видоизменить. Кроме того, для рациональной организации работы нужно было иметь по меньшей мере 5—6 машин. Конечно, самое лучшее иметь одновременно 25 машин, тогда можно было бы организовать занятие в академической группе с полной гарантией «обратной связи» между студентами и преподавателями.

Недостаток материалов был основной причиной того, что в 1963/64 году было изготовлено только 6 машин. Мы приобрели также одну учебную машину «Ласточка». Таким образом, у нас имеется 7 учебных машин.

Сейчас нами накоплен некоторый опыт использования

учебных машин для проведения коллоквиумов, для проверки готовности студентов к лабораторным работам по радиотехнике и общей физике, по спецпрактикумам, на практических занятиях по общей физике, для проверки умения студентов считать с помощью логарифмической линейки и т. п.

Весь накопленный опыт говорит о значительной экономии времени, которую дает использование машин на разных видах учебной работы.

Студенты использовали экзаменаторы на педагогической практике в школах. На каждом уроке с помощью машин было выставлено значительное число оценок. Программы для машин составляли студенты.

УСТРОЙСТВО МАШИНЫ

При разработке конструкции мы использовали схему экзаменатора Свердловского пединститута, однако впоследствии мы ее упростили. См. схему № 1.

Наши приборы собраны на электромагнитных реле типа РЭС-6 РФО 452103 и РФО 452113 или РЭФ-6 РФО 452100 и 452110.

Каждая машина содержит 14 реле, 14 переключателей, миллиамперметр, низковольтные лампы накаливания и реле времени на стабилитроне СГЗ-С.

Силовая часть выполнена на полупроводниковых диодах.

Коммутатор мы из схемы исключили, заменив его 7 переключателями, в результате сократились габариты прибора, время на подготовку прибора к работе и повысилась надежность конструкции.

Переключатели собрали парами, навстречу друг другу, это позволило упростить монтажную схему прибора. Предлагаемая нами схема электронного реле времени очень проста, она основана на работе релаксационного генератора.

Изменяя величину сопротивления и соответственно зарядный ток, изменяем время зарядки конденсатора. При достижении потенциала зажигания происходит газовый разряд в стабилитроне и срабатывает электромагнитное реле. Исполнительные контакты реле включают освещение надписи «ваше время истекло», блокируют кнопку

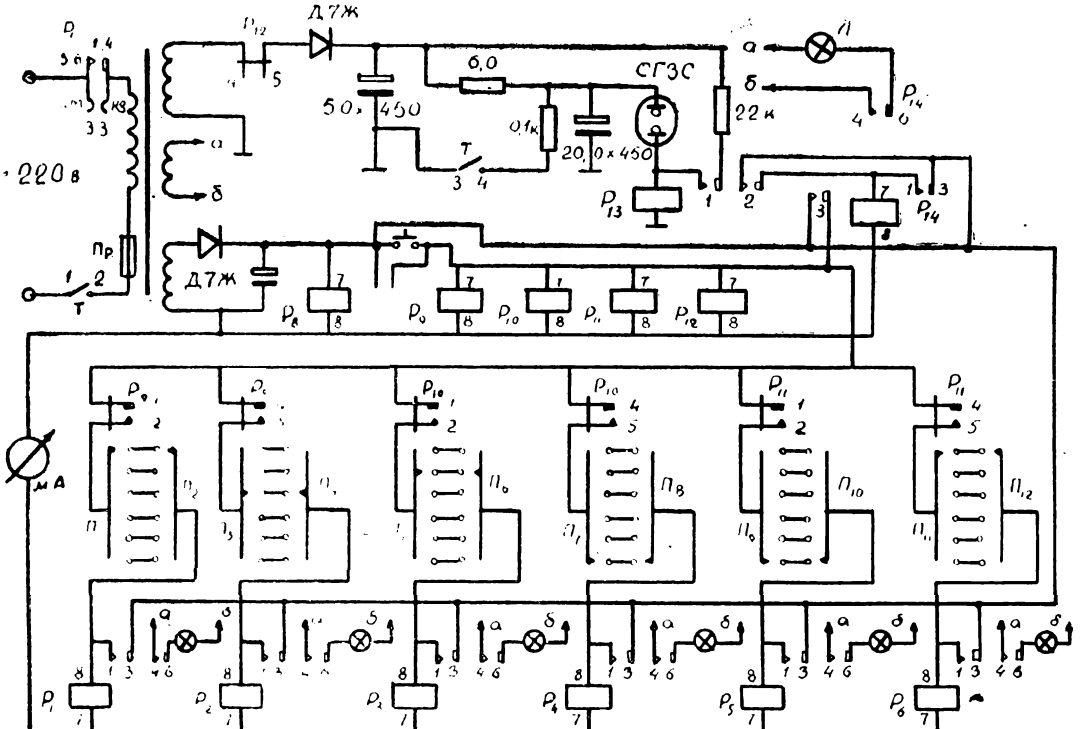


Рис. 1

прибора, тем самым не дают возможности учащемуся продолжать работу, и дают оценку.

Стоимость прибора около 55 руб., причем половину этой суммы 28 руб. составляет стоимость переключателей (у нас переключатели с фарфоровыми платами).

Если заменить их переключателями другого типа, цена прибора значительно снизится.

«Памятью» прибора являются переключатели, программа задается путем установки их в нужное положение.

Приборы изготовлялись студентами. У приборов хороший внешний вид. Их трудно отличить от фабричных.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИБОРОВ

а) Проверка готовности студентов к лабораторным работам.

Преподавателями общей физики, радиотехники, спецпрактикума были составлены билеты для проверки подготовленности студентов к выполнению лабораторных работ.

Практика показала, что очень много зависит от того, как составлен билет, как подобраны неправильные ответы. Если в неправильных ответах даются глубокие ошибки, то их студенты легко находят, даже имея сравнительно низкую подготовку. Так, например, если на вопрос, укажите формулу закона Био-Саввара-Лапласа даются в качестве ответов формулы законов Ома, Кулона, Фарадея, то среди них, и не зная формулы, ее легко можно найти, но если даются формулы очень похожие на правильную, то определяются действительные знания. Лучше всего, если ошибки в формулах — типичные ошибки студентов.

Практика работы показала, что при использовании машин в лаборатории преподаватель может в течение очень малого времени проверить степень подготовки студентов по определенной теме.

Достаточно иметь в лаборатории 2—3 машины, чтобы в течение двухчасового занятия преподаватель мог проконтролировать знания подгруппы в 12—13 человек.

В лаборатории спецпрактикума по полупроводникам, атомной и ядерной физике использовалась обучающая

машина К-53 «Ласточка». К ней были составлены программы.

Машина использовалась в основном в режиме «контроль» для проверки подготовленности студентов к выполнению лабораторных работ и для приема зачетов. Для слабо подготовленных студентов машина иногда включалась в режиме «самоконтроль», т. е. как обучающая.

Программы к каждой лабораторной работе содержат материал, который студенты должны самостоятельно изучить по рекомендованной литературе. Он располагается в логической последовательности и делится на небольшие порции. Контроль за усвоением каждой порции и осуществлялся нами на обучающей машине.

Применение таких программ для проверки усвоения студентами рекомендованной литературы стимулирует их самостоятельную работу, сохраняет время преподавателя, который может больше внимания уделить обучению студентов правильной методике проведения эксперимента, более глубокой проверке знаний студентов.

Однако применение обучающей машины ни в коем случае не исключает собеседования по отдельным вопросам методики выполнения эксперимента, обоснованию ответов, полученных результатов, обобщению изученного материала.

В таком же плане были использованы машины в лаборатории радиотехники.

б) Коллоквиум по общей физике

Курс общей физики требует проведения значительного числа коллоквиумов. Много времени уходит у преподавателя, ведущего лекционный курс, на проведение устных коллоквиумов по группам. Если на курсе обучается 100 человек (4 академических группы), то коллоквиум обычно проводится 2-часовой на группу. При этом только 8—10 студентов участвуют в работе коллоквиума (отвечают у доски, выводят формулы и т. д.). Проверить знания всех студентов никак не удается. Расход времени студента составляет при этом два часа, а преподавателя — 8 часов. Практикуются поэтому письменные коллоквиумы по вопросам теории. Такой коллоквиум занимает два часа (для целого курса) и дает возможность про-

контролировать знания студентов. Преподаватель затрачивает 4—5 часов на проверку работ. Однако наряду с такой формой проверки знаний студентов, необходима оперативная индивидуальная форма контроля, которая проводилась бы в еще более короткое время. Тогда число коллоквиумов можно увеличить, проверку знаний, контроль над самостоятельной работой студентов сделать более оперативной. Такую возможность дают электронные экзаменаторы. Для того, чтобы сдать коллоквиум на электронном экзаменаторе, студент затрачивает около 6 минут. Только в некоторых случаях требуется дополнительное время 3—4 минуты.

Время преподавателя тоже расходуется более экономно. Оно зависит от числа машин. При одной группе, сдававшей на четырех машинах, 25 человек ответили в общей сложности за 1 час. 20 минут. Когда же было установлено 6 машин, 60 студентов сдали коллоквиум за 2 часа 10 минут.

Результаты коллоквиума по оптике (общий курс физики) на III курсе математиков, по оценкам, выданным машинами, представлены в таблице.

Курс	Группа	Отлично	Хорошо	Удовлет.	Неудовлет.	Не явились
III	А	2	8	7	—	2
	Б	1	13	6	2	1
	В	4	9	5	—	1
	Г	6	15	4	—	—

Результаты коллоквиума соответствуют знаниям студентов, оцененным другими путями (на практических занятиях). Так, например, нам известно, что группа «Г» значительно сильнее группы «Б». Результаты коллоквиума на машинах говорят о том же. Подтверждение объективности результатов коллоквиума дали также экзамены.

Очень важно, чтобы программы для различных машин были различными. Необходимо также тщательно следить, чтобы программа оставалось чистой, чтобы на ней не появилось отметок, отличающих верный ответ.

При работе с электронными экзаменаторами удается не только получить общую оценку знаний студента. По тому, как отвечает студент, преподаватель может определить вопросы, которые были мало разъяснены в лекциях и на практических занятиях.

Так, например, при коллоквиуме по оптике выяснилось, что многие студенты не знают, что в формуле для максимума при отражении света от тонкой пленки учитывается потеря полволны при отражении света от более плотной среды.

в) Использование учебных машин на практических занятиях

Примером использования учебных машин во время практических занятий может служить опыт по работе с логарифмической линейкой.

Студентам были вручены программы различного вида расчетов. Даны на них ответы (один верный из семи). Расчеты производятся с помощью логарифмической линейки. Выполнив работу по одной программе, студент может перейти на другую машину и поработать по другой программе. Таким образом, организуется весьма полезная тренировка студентов в работе с логарифмической линейкой.

На практических занятиях мы применяли программы, в которых вовсе не предлагались готовые формулы на выбор. Некоторые программы представляли собой сумму задач, для решения которых студент должен сам вспомнить необходимые понятия, законы, формулы, применить их на практике для решения конкретной задачи и тогда лишь получить ответ, который он может проверить по программе. При таком методе свободного конструирования ответа, программа ничего не подсказывает студенту, он работает более самостоятельно. Метод свободного конструирования ответа имеет ряд преимуществ перед методом узнавания верного ответа среди ряда неверных.

ПРОГРАММЫ ДЛЯ УЧЕБНЫХ МАШИН

ПРОГРАММА № 1

к лабораторной работе «Машина Атвуда».

I. Какой вывод можно сделать из первого упражнения проверки закона пути равноускоренного движения?

1. Скорость постоянна во всех точках пути.
2. Ускорение постоянно во всех точках пути.
3. Ускорение равно нулю.

II. Как можно увеличить точность результатов на машине Атвуда?

1. Уменьшить путь, увеличить время.
2. Увеличить путь и нагрузку.
3. Увеличить путь, уменьшить нагрузку, чтобы время прохождения увеличилось.

III. Принадлежности, необходимые к работе.

1. Машина со сплошной и кольцевой платформами, грузы, два секундомера, электромагнит, ключ.
2. Машина со сплошной и кольцевой платформами, секундомер и грузы.
3. Машина со сплошной и кольцевой платформами, два секундомера, ключ.

IV. Какие помехи не учитываются в работе?

1. Инерцию блока, трение.
2. Инерцию блока, трение, механическое включение секундомера.
3. Трение, механическое включение секундомера.

V. Закон скорости проверяется по формуле $a = \frac{V_t}{t}$.

Как найти V_t?

1. Из равноускоренного движения первого участка $V = \frac{S}{t}$.
2. Из равномерного движения второго участка $V = \frac{2S}{t}$.
3. Конечная скорость равноускоренного движения равна скорости равномерного движения.

VI. Чему равна движущая сила в третьем упражнении и перемещаемая масса, если перегрузки A=5,4 г, B=2 г?

1. F=3,4 г M=7,4 г.
2. F=3,4 г M=7,4 г
3. F=3,4 г M=7,4 г.

VII. По какой формуле определяется относительная ошибка $a = \frac{2S}{t^2}$?

1. $\frac{\Delta a}{a} = 2\frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta t}{t}$
2. $\frac{\Delta a}{a} = 2\frac{\Delta S}{S} + 2\frac{\Delta t}{t}$
3. $\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta S}{S} + 2\frac{\Delta t}{t}$

ПРОГРАММА № 2

к лабораторной работе «Изучение упругого и неупругого удара»

I. Как записывается закон сохранения количества движения в работе по определению скорости пули?

1. $mU = (M+m)v^2$
2. $(m+M)v = mU$
3. $mv = (M+m)u$
4. $(m+M)v = (m+M)u$
5. $mU = Mv$

II. Какова математическая запись закона, на основании которого из уравнения, имеющегося в ответах на первый вопрос, можно исключить скорость отклонения маятника?

1. $\frac{mU^2}{2} = Mgh$
2. $\frac{(M+m)U^2}{2} = (M+m)gh$
3. $\frac{(M+m)v^2}{2} = (M+m)gh$
4. $\frac{(M+m)v^2}{2} = Mgh$
5. $\frac{Mv^2}{2} = Mgh$

III. Какие величины необходимо измерить в процессе подготовки и выполнения работы, чтобы подсчитать скорость полета пули?

1. m, M, h, U, l
2. m, M, α, d
3. m, M, d, l
4. m, M, u, h
5. m, M, d, l
6. m, M, h, d

IV. Почему масса маятника берется значительно больше массы пули?

1. Чтобы пуля застряла в маятнике.
2. Чтобы маятник не отклонился на слишком большой угол.
3. Чтобы можно было применить закон сохранения количества движения.
4. Чтобы можно было применить закон сохранения энергии.
5. Чтобы удар был абсолютно неупругим.

V. Если обозначить скорости шаров до удара V_1 и V_2, а после удара U_1 и U_2, то какой формулой определяется коэффициент восстановления k?

1. $K = \frac{v_1}{v_2}$
2. $K = \frac{u_1 - v_1}{u_2 - v_2}$
3. $K = \frac{u_1 - u_2}{v_1 - v_2}$
4. $K = \frac{u_1}{u_2}$
5. $K = \frac{v_1 - v_2}{u_1 - u_2}$
6. $K = \frac{u_1}{v_1}$

VI. Каковы условия постановки опыта по определению коэффициента восстановления, чтобы можно было воспользоваться расчетной формулой $K = \left(\frac{S_n}{S_1}\right)^{\frac{1}{n}}$?

1. Первоначальные отклонения шаров должны быть малы, а массы одинаковы.
2. Шары должны быть сделаны из одного материала, иметь равные диаметры.
3. Шары должны быть сделаны из одного материала, иметь равные массы и отклонения на малые углы.

4. Шары должны быть сделаны из одинакового материала, иметь одинаковые диаметры и отклоняться на равные углы.
5. Шары должны быть упругими, одинаковой массы и отклоняться на малые углы.

VII. При выполнении условий VI вопроса, какие характеристики движения шаров, имеющие прямое отношение в выводу формулы $K = \left(\frac{S_n}{S_1}\right)^{\frac{1}{n}}$, будут находиться в следующих соотношениях:

1. Скорости шаров в любой момент времени равны по величине, но противоположны по направлению.
2. Ускорения шаров равны по величине и направлению.
3. Ускорения шаров в любой момент времени противоположны, а скорости направлены в одну сторону.
4. Скорости шаров в любой момент времени равны по величине и направлению.
5. Ускорения и скорости шаров в любой момент времени одинаковы по величине и направлению.
6. Ускорения шаров в любой момент времени противоположны по величине и направлению.

ПРОГРАММА № 3

к лабораторной работе «Определение коэффициента трения»

I. Что такое коэффициент трения скольжения?

1. Коэффициентом трения скольжения называется отношение силы трения к весу тела.
2. Коэффициентом трения скольжения называется отношение силы трения к силе нормального давления.
3. Коэффициентом трения скольжения называется отношение веса тела к силе трения.

II. Записать закон Аммонтона-Кулона.

1. $F_{тр.} = \frac{K}{K_1} P$
2. $F_{тр} = \frac{K}{N}$
3. $F_{тр.} = K \cdot N$

III. Является ли коэффициент трения скольжения постоянной величиной?

1. Коэффициент трения скольжения является постоянной величиной.
2. Коэффициент трения зависит от площади трущихся поверхностей.
3. Коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости движения и несколько увеличивается при увеличении давления, но не зависит от площади трущихся поверхностей.

IV. Влияет ли на трение температура при скольжении металла по металлу?

1. Температура влияет на трение при скольжении двояким образом: с изменением температуры меняется твердость трущихся поверхностей, с другой стороны, вследствие нагревания может значительно возрости окисление поверхностей, что делает поверхности более шероховатыми.
2. Не влияет.
3. С повышением температуры трение возрастает.

V. Как влияет смазка на величину трения?

1. Сильно уменьшает трение, т. к. занимает непосредственное трение двух твердых поверхностей трением внутри жидкости (внутреннее трение).
2. Не изменяет трения.
3. Незначительно уменьшает трение.

VI. Записать Кулонов закон трения катания.

1. $F_{тр.} = \alpha \frac{N}{R}$
2. $F_{тр.} = \alpha R N$
3. $F_{тр.} = \alpha \frac{R}{N}$

VII. Зависит ли коэффициент трения катания от радиуса катка?

1. Не зависит.
2. С увеличением радиуса он уменьшается.
3. Зависит прямо пропорционально.

ПРОГРАММА № 4

к лабораторной работе «Взвешивание на аналитических весах»

1. Формула, по которой определяется нулевая точка весов?

1. $\ell_0 = \dfrac{\frac{\ell_1+\ell_3}{2} + \ell_2}{2}$

2. $\ell_0 = \dfrac{\frac{\ell_1+\ell_2}{2} + \ell_3}{2}$

3. $\ell_0 = \dfrac{\frac{\ell_1+\ell_3}{2} - \ell_2}{2}$

II. Что называется чувствительностью весов?

1. Чувствительностью весов называется отклонение стрелки от нулевой точки при перегрузке одной из чашек весов грузом в 2 мг.
2. Чувствительностью весов называется отклонение стрелки от нулевой точки при перегрузке одной из чашек грузом в 1 мг.
3. Чувствительностью весов называется отклонение стрелки от нулевой точки при перегрузке одной из чашек весов грузом в 3 мг.

III. Написать формулу для определения чувствительности.

1. $n = l - l_0$

2. $n = l + l_0$

3. $n = l_0 - l$.

IV. Как определить при взвешивании десятые доли миллиграмма?

1. $x = \frac{e_0 - t}{n}$
2. $x = \frac{t - e_0}{n}$
3. $x = \frac{n}{t - e_0}$

V. Как привести вес тела к пустоте?

1. $P = P_0 + P\mathfrak{D}\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)$
2. $P_0 = P + P\mathfrak{D}\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)$
3. $P_0 = P + P\mathfrak{D}\left(\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d}\right)$

VI. В каком случае необязательно вводить поправку на выталкивающую силу воздуха?

1. $d_0 > d$.
2. $d_0 < d$.
3. $d_0 = d$.

VII. С какой точностью можно взвесить на аналитических весах типа АДВ-200?

1. 0,1 мГ.
2. 0,01 мГ.
3. 1 мГ.

ПРОГРАММА № 5

к лабораторной работе «Определение удельной теплоемкости жидкости методом электрического нагревания»

I. Формула молярной теплоемкости.

1. $C_м = R \cdot c_{уд}$.
2. $C_м = M \cdot c_{уд}$.
3. $C_м = V \cdot c_{уд}$.
4. $C_м = (R+2) c_{уд}$.
5. $C_м = (i+2) c_{уд}$.
6. $C_м = i c_{уд}$.
7. $C_м = \frac{i+R}{2} c_{уд}$

II. Каковы наиболее выгодные условия опыта?

1. Необходимо, чтобы начальная температура была на 2—3° ниже комнатной, а конечная на 2—3° выше комнатной.
2. Необходимо, чтобы давление постепенно менялось.
3. Необходимо, чтобы первоначальное давление было меньше конечного.
4. Необходимо, чтобы температура в конце опыта была на 8—10° выше комнатной.
5. Необходимо, чтобы температура оставалась постоянной.
6. Необходимо, чтобы конечное давление превышало первоначальное на 8—10° мм рт. ст.
7. Необходимо, чтобы температура во время опыта повышалась на 20—30°.

III. Каким законом определяется количество теплоты Q, выделенной в калориметре?

1. $Q = RUt$	Закон Ома.
2. $Q = J^2Rt$	Закон Джоуля-Ленца.
3. $Q = \frac{RJ}{U}t$	Закон Кирхгофа.
4. $Q = U \cdot t \cdot J$	Закон Гальвани.
5. $Q = \frac{UJ}{R} \cdot t$	Закон Роберта Майера.
6. $Q = \frac{U^2R}{t}$	Закон Клапейрона.
7. $Q = 0{,}24\ \frac{JU}{t}$	Закон Менделеева.

IV. Какое соотношение между удельной теплоемкостью и теплоемкостью тела?

1. $C_m = C_{уд.}$
2. $C_m = \mu C_{уд.}$
3. $C_m = mC_{уд.}$
4. $C_m = (\mu + 2)RC_{уд.}$
5. $C_m = (R+2)C_{уд.}$
6. $C_m = \frac{R}{2}C_{уд.}$
7. $C_m = \frac{R}{i}C_{уд.}$

где теплоемкость тела C_m, а $C_{уд.}$ — его удельная теплоёмкость.

V. Зачем второй опыт требует обязательного обмена нагревателей местами?

1. Во избежание ошибок, связанных с длительным пропусканием тока.
2. Во избежание ошибок, связанных с возможным различием сопротивлений нагревателей.
3. Во избежание ошибок, связанных с возможным различием количества воды, налитой в калориметр.
4. Чтобы устранить ошибку в измерении давлений.

5. Чтобы устранить погрешности опыта.
6. Чтобы устранить разницу объемов обоих калориметров.
7. Чтобы устранить ошибку в измерениях температуры опыта.

ПРОГРАММА № 6

к лабораторной работе «Определение термического коэффициента давления воздуха»

I. Что такое термический коэффициент давления воздуха?

1. Это отношение

1. $\alpha = \frac{C_v - C_p}{C_v} R$
2. $\alpha = \frac{P_2 - P_1}{P_1} t$
3. $\alpha = \frac{P_2 - P_1}{t} P_1$
4. $\alpha = \frac{P_2 - P_1}{P_1 t_2 - P_2 t_1}$
5. $\alpha = (c_p - c_v) R$
6. $\alpha = M(P_2 - P_1)$
7. $\alpha = \frac{P_2 - P_1}{vt}$

II. Какой из процессов: изотермический, изобарический, изохорический и т. д. имеет место в данном опыте?

1. Происходит изотермический процесс.
2. Происходит изохорический процесс.
3. Происходит изобарический процесс.
4. Происходит политропический процесс.
5. Происходит изотермический и изобарический процессы одновременно.
6. Происходит политропический и изотермический процессы одновременно.
7. Происходит политропический и изобарический процессы одновременно.

III. Какой газ мы называем идеальным?

1. Газ, температура которого постоянна, называется идеальным.
2. Газ, который подчиняется уравнению Клапейрона—Менделеева.

3. Газ, который рассматривается как совокупность движущихся молекул или атомов и $E_к$ зависит только от T, называется идеальным.
4. Газ, который рассматривается как совокупность свободных атомов, называется идеальным.
5. Газ, который рассматривается как совокупность независимых координат, называется идеальным.
6. Газ, плотность которого постоянна, называется идеальным.

IV. Формула Клапейрона-Менделеева.

1. $PV = \frac{\mu}{m} RT$
2. $PV = \mu RT$
3. $PV = \frac{RT}{m}$
4. $PV = \frac{mR}{\mu T}$
5. $PV = \frac{m}{\mu} RT$
6. $\mu PV = \frac{RT}{m}$
7. $\mu PV = \frac{mR}{T}$

V. Почему можно использовать законы идеальных газов для реальных?

1. Потому, что давление в опыте const.
2. Потому, что V = const.
3. Потому, что газ имеет небольшое давление и нагревание происходит быстро.
4. Потому, что идеальный газ обладает столькими же степенями свободы, что и реальный.
5. Потому, что газ имеет невысокую температуру, но высокое давление.
6. Потому, что V = const.
7. Потому, что газ и идеальный и реальный имеет одинаковую плотность.

VI. Единицы измерения термического коэффициента давления воздуха.

1. α = 1/град.
2. α = 2 моль/град.
3. α = 1 моль/град.
4. α = моль/град.
5. α = атм/град.
6. α = атм/град моль.
7. α = дж/град.

ПРОГРАММА № 7

Системы единиц. Механика.

(Самоконтроль)

I. Каковы основные единицы системы СИ и технической?

1. см · г · сек; м · кг · сек.
2. м · кг · сек; см · г · сек.
3. м · кг · сек; м · кГ · сек.
4. см · г · мин; м · кг · мин.
5. м · кг · кал; см · г · кал.
6. см · дн · сек; см · дн · мин.
7. м · кГ · сек; см · Г · сек.

II. Каковы единицы силы, работы, мощности в системах СИ и CgS?

1. дж, эрг, вт; дн, эрг, вт.
2. дж, вт, сек; эрг, дн, вт.
3. ньютон, дж, квт; дн, эрг, вт.
4. ньютон, дж, вт; дн, эрг, эрг/сек.
5. ньютон, дж, вт; дн, эрг, $\frac{\text{вт}}{\text{сек.}}$
6. дж, вт, ньютон; дн, эрг, $\frac{\text{эрг}}{\text{сек.}}$
7. вт, дж, ньютон; дн, эрг, $\frac{\text{дн}}{\text{сек.}}$

III. Каково соотношение единиц ньютон-дина и джоуль-эрг?

1. $H = 10^3$ дн; $дж = 10^3$ эрг.
2. $H = 10^2$ дн; $дж = 10^5$ эрг.
3. $H = 9{,}8 \cdot 10^2$ дн; $дж = 10^5$ эрг.
4. $H = 9{,}8 \cdot 10^5$ дн; $дж = 9{,}8 \cdot 10^3$ эрг.
5. $H = 10^7$ дн; $дж = 10^5$ эрг.
6. $H = 10^5$ дн; $дж = 10^7$ эрг.
7. $H = 10^6$ дн; $дж = 10^8$ эрг.

IV. Сколько дин содержится в Г-силы?

1. 1 Г = 10 дн.
2. 1 Г = 9,8 дн.
3. 1 Г = 98 дн.
4. 1 Г = 980 дн.
5. 1 Г = 0,98 дн.
6. 1 Г = 0,980 дн.
7. 1 Г = 10^3 дн.

V. Сколько киловатт-час содержит джоулей?

1. 1 квт · ч = 10^5 дж.
2. 1 квт · ч = 10^7 дж.
3. 1 квт · ч = 3,6 дж.
4. 1 квт · ч = 3,6 · 10^5 дж.
5. 1 квт · ч = 3,6 · 10^6 дж.
6. 1 квт · ч = 9,8 · 10^5 дж.
7. 1 квт · ч = 10^6 дж.

VI. Каково соотношение между единицами работы кГм и джоуль?

1. 1 кГм = 0,9 дж.
2. 1 кГм = 10^5 дж.
3. 1 кГм = 9,8 дж.
4. 1 кГм = 0,98 дж.
5. 1 кГм = 7,2 дж.
6. 1 кГм = 3 · 10^2 дж.
7. 1 кГм = 10^2 дж.

VII. Единицы измерения работы, теплоты и энергии и температуры в системе СИ?

1. дж, кГм, кал, T^0K.
2. эрг, кал, кГм, t^0C.
3. дж, дж, дж, T^0K.
4. дж, дж, дж, t^0C.
5. кГм, кал, эрг, T^0K.
6. кал, дж, эрг, t^0C.
7. эрг, кГм, ккал, t^0C.

ПРОГРАММА № 8

Коллоквиум по общей физике

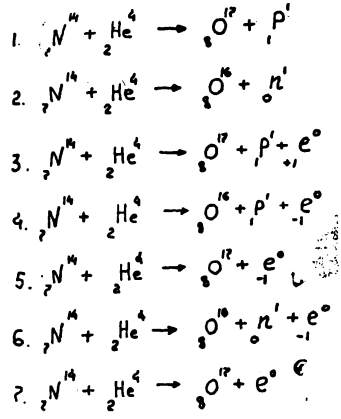
I. Определить длину волны волнового процесса, соответствующего движению электронов со скоростью 5000 км/сек.

1. 0,146 A^0.
2. 1,46 A^0.
3. 14,6 A^0.
4. 146 A^0.
5. 0,0146 A^0.
6. 1,46 · 10^{-3} A^0.
7. 1,46 · 10^5 A^0.

II. Какова была длина волны рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом 60^0 длина волны рассеянного излучения оказалась равной $2{,}54 \cdot 10^{-0}$см.

1. 0,0242 A^0.
2. 0,0266 A^0.
3. 2,42 A^0
4. 0,242 A^0.
5. 242 A^0.
6. 2,66 A^0.
7. 0,266 A^0.

III. Написать ядерную реакцию, когда при обстреле атомов азота α-частицами был получен кислород.



IV. Элемент $_{92}U^{235}$ в результате радиоактивного распада превращается в $_{82}Pb^{207}$. Сколько α и β частиц выбрасывает при этом каждый атом.

1. 3α 5β.
2. 2α 4β.
3. 6α 4β.
4. 8α 3β.
5. 7α 4β.
6. 10α 5β.
7. 5α 10β.

V. Вычислить энергию связи ядра дейтерия.

1. 8,2 мэв.
2. 0,25 мэв.
3. 180 мэв.
4. 1,7 мэв.
5. 220 мэв.
6. 0,014 мэв.
7. 22 мэв.

VI. Давление света на некоторое тело равно $2 \cdot 10^{-5}$ кг/м^2. Выразить это давление в дн/см^2.

1. $1{,}96 \cdot 10^{-3}$.
2. $1{,}5 \cdot 10^{-8}$.
3. $4{,}5 \cdot 10^{5}$.
4. $8{,}9 \cdot 10^{-6}$.
5. $3{,}82 \cdot 10^{-5}$.
6. $9{,}12 \cdot 10^{+6}$.
7. $2{,}32 \cdot 10^{3}$.

VII. Работа выхода электронов из вольфрама равна 4,54 эв. Выразить эту величину в эргах, джоулях, кгм.

1.	$7{,}26 \cdot 10^{-12}$ э;	$7{,}26 \cdot 10^{-19}$ дж;	$7{,}1 \cdot 10^{-18}$ кГм.
2.	$3{,}58 \cdot 10^{-10}$ э;	$3{,}58 \cdot 10^{-3}$ дж;	$3{,}4 \cdot 10^{4}$ кГм.
3.	$7{,}26 \cdot 10^{-12}$ э;	$7{,}26 \cdot 10^{-19}$ дж;	$7{,}41 \cdot 10^{-20}$ кГм.
4.	$3{,}58 \cdot 10^{-10}$ э;	$3{,}58 \cdot 10^{-10}$ дж;	$3{,}45 \cdot 10^{-5}$ кГм.
5.	$8{,}32 \cdot 10^{-14}$ э;	$8{,}32 \cdot 10^{-18}$ дж;	$8{,}23 \cdot 10^{-17}$ кГм.
6.	$1{,}5 \cdot 10^{12}$ э;	$1{,}5 \cdot 10^{5}$ дж;	$1{,}3 \cdot 10^{6}$ кГм.
7.	$1{,}5 \cdot 10^{12}$ э;	$1{,}5 \cdot 10^{5}$ дж;	$1{,}2 \cdot 10^{4}$ кГм.

ПРОГРАММА № 9

Коллоквиум по общей физике

I. Определить длину волны пули, массой 10 г, летящей со скоростью 1000 м/сек.

1. $9{,}56 \cdot 10^{-20}$ см.
2. $3{,}62 \cdot 10^{-21}$ см.
3. $1{,}3 \cdot 10^{-34}$ см.
4. $1{,}98 \cdot 10^{-34}$ см.
5. $8{,}9 \cdot 10^{-26}$ см.
6. $1{,}58 \cdot 10^{-30}$ см.
7. $6{,}62 \cdot 10^{-33}$ см.

II. Определить изменение длины волны лучей, претерпевших комптоновское рассеяние, если рассеянный луч наблюдается под углом 35° к направлению первоначального луча.

1. 0,435 А°.
2. 0,00435 А°.
3. 4,35 А°.
4. 0,0435 А°.
5. $7{,}35 \cdot 10^{-16}$ А°.
6. $7{,}35 \cdot 10^{16}$ А°.
7. 43,5 А°.

III. Написать ядерную реакцию для случая: атому лития при бомбардировке захватывают α-частицы и испускают нейтроны.

1. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_5B^{11} + 3{}_0n^1$

2. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_5B^9 + {}_0n^1 + {}_1P^1$

3. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_7N^7 + {}_0n^1 + {}_{-1}e^0$

4. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_5B^{10} + 2{}_0n^1$

5. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_5B^{10} + {}_0n^1$

6. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{10} + {}_0n^1 + {}_{-1}e^0$

7. ${}_3Li^7 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{10} + {}_0n^1 + {}_{-1}e^0$

IV. Элемент U^{235} в результате радиоактивного распада превращается в Pb^{207}. Сколько α и β-частиц выбрасывает при этом каждый атом?

1. 2α 3β.
2. 3α 5β.
3. 7α 4β.
4. 10α 5β.
5. 3α 5β.
6. 6α 4β.
7. 2α 3β.

V. Вычислить энергию связи ядра трития.

1. 0,42 мэв.
2. 3,8 мэв.
3. 900 мэв.
4. 10 мэв.
5. 8,1 мэв.
6. 62,3 мэв.
7. 50 мэв.

VI. Солнечная постоянная излучения (энергия, падающая от солнца на единицу поверхности земли в единицу времени) равна 1,96 кал/мин. м^2. Выразить значение этой постоянной в эрг/см^2 сек.

1. $1{,}8 \cdot 10^4$.
2. $2{,}5 \cdot 10^8$.
3. 18
4. 132
5. $8{,}9 \cdot 10^3$.
6. $1{,}8 \cdot 10^5$.
7. 756

VII. Работа выхода электронов из цезия равна 1,97 эв. Выразить эту величину в эргах, джоулях и кгм.

1.	$1{,}23 \cdot 10^{12}$ э;	$12{,}3 \cdot 10^{5}$ дж;	$125 \cdot 10^{4}$ кГм.
2.	$8{,}2 \cdot 10^{-31}$ э;	$8{,}2 \cdot 10^{-38}$ дж;	$8 \cdot 10^{-37}$ кГм.
3.	$5 \cdot 10^{-20}$ э;	$5 \cdot 10^{-13}$ дж;	$4{,}8 \cdot 10^{-12}$ кГм.
4.	$3{,}14 \cdot 10^{-12}$ э;	$3{,}14 \cdot 10^{-19}$ дж;	$3{,}08 \cdot 10^{-18}$ кГм.
5.	$3{,}14 \cdot 10^{-12}$ э;	$3{,}14 \cdot 10^{19}$ дж;	$3{,}2 \cdot 10^{-20}$ кГм.
6.	$8{,}2 \cdot 10^{-13}$ э;	$8{,}2 \cdot 10^{-20}$ дж;	$7{,}79 \cdot 10^{-21}$ кГм.
7.	$7{,}2 \cdot 10^{12}$ э;	$7{,}2 \cdot 10^{5}$ дж;	$7{,}3 \cdot 10^{4}$ кГм.

ПРОГРАММА № 10

к лабораторной работе «Изучение телевизора «Рекорд»

I. Как регулируется контрастность изображения в телевизоре?

1. При помощи R_{2-32}, путем изменения потенциала катода.
2. При помощи R_{3-9}, путем изменения напряжения анода.
3. При помощи R_{2-11}, путем изменения напряжения смещения на сетке $Л_{2-1}$.
4. При помощи магнита ионной ловушки.
5. При помощи R_{3-12}, путем изменения частоты строк.
6. При помощи R_{3-3}, путем увеличения крутизны характеристики кинескопа.
7. При помощи R_{2-48}, путем изменения напряжения смещения на сетке $Л_{2-8}$.

II. Как регулируется яркость изображения?

1. Изменением напряжения на управляющем электроде, сопротивлением в его цепи.
2. Изменением напряжения на лампе 6П14П.
3. Изменением напряжения накала кинескопа.
4. Изменением напряжения на аноде селектора, переменным сопротивлением.
5. Изменением напряжения на катоде кинескопа.
6. Увеличением напряжения на детекторе видеоканала.
7. Изменением смещения на сетке видеусилителя.

III. Каково назначение магнита ионной ловушки?

1. Для изменения контрастности.

2. Для фокусировки электронного луча.

3. Для захватывания и накопления положительных ионов.

4. Для увеличения четкости изображения.

5. Для отклонения отрицательных ионов от оси трубки.

6. Для отклонения электронного луча к оси трубки, т. к. пушка расположена под углом к оси горловины кинескопа.

7. Для отклонения отрицательных ионов к оси трубки, т. к. пушка расположена под углом к оси горловины.

IV. Как регулируют размер изображения по вертикали?

1. При помощи магнита ионной ловушки.

2. При помощи R_{3-12}, изменением частоты строк.

3. При помощи R_{3-12}, изменением режима $Л_{3-2}$ анода.

4. При помощи R_{3-12}, изменением частоты кадров.

5. При помощи R_{3-3}, изменением потенциала сетки $Л_{3-1}$.

6. При помощи R_{3-23}, изменением потенциала сетки $Л_{3-3}$.

7. При помощи C_{2-40}, изменением зарядного тока $Л_{2-7}$.

V. Как регулируется линейность изображения по вертикали?

1. При помощи $Л_{3-5}$, путем зажигания кинескопа.

2. При помощи R_{3-3}, путем изменения времени зарядки C_{3-5}.

3. При помощи R_{3-9}, путем изменения обратной связи между анодом и катодом $Л_{3-1}$.

4. При помощи отклоняющих катушек.

5. При помощи магнита ионной ловушки.

6. При помощи R_{2-11}, изменением усиления сигнала.

7. При помощи C_{3-9}, изменяя длительность синхроимпульса.

VI. Как изменяется частота генератора строчной развертки?

1. Путем увеличения потенциала сетки $2Л_{3-1}$.

2. Путем помощи магнита ионной ловушки.

3. При помощи дифференцирующей цепочки.

4. Путем именения потенциала сетки $7Л_{3-3}$, сопротивлением R_{3-23}.

5. Путем изменения потенциала анода $6Л_{3-3}$.

6. Путем изменения зарядки C_{3-17}.

7. Путем изменения потенциала сетки $7Л_{3-2}$, сопротивлением.

VII. Как изменяется частота генератора кадровой развертки?

1. Путем изменения потенциала сетки $7Л_{3-3}$, сопротивлением R_{3-9}.

2. Путем изменения потенциала сетки $7Л_{3-2}$, сопротивлением R_{3-12}.

3. Изменением полярности демпфера.

4. При помощи лампы 6Н1П, изменяя сдвиг фаз на ее аноде.

5. При помощи электролитического конденсатора C_{3-23}.

6. Изменением крутизны характеристики Л-3-1, сопротивлением R_{3-9}.

7. При помощи интегрирующей цепочки.

ПРОГРАММА № 11

К лабораторной работе «Изучение работы термисторов»

I. Как влияет наличие примесей в металле на его электропроводность?

1. Электропроводность увеличивается от наличия примесей.

2. Электропроводность не зависит от наличия примесей.

3. Электропроводность металла резко возрастает при наличии примесей.

4. Электропроводность уменьшается от наличия примесей.

II. Каким выражением определяется температурная зависимость сопротивления полупроводника?

1. $R = Ce^{-\frac{B}{T}}$ C, B, A — постоянные величины;

2. $R = Ae^{\frac{B}{T}}$ к — постоянная Больцмана;

3. $R = Ce^{-\frac{\Delta E}{2KT}}$ Δ E — энергия активации;

4. $R = R_0(1+\alpha t)^{\alpha}$ — температурный коэффициент сопротивления.

III. Почему электропроводность полупроводников растет с увеличением температуры?

1. Возрастает подвижность носителей тока с увеличением температуры.

2. Уменьшается средний свободный пробег носителей тока в п/п с увеличением температуры.

3. Рост числа носителей тока происходит гораздо быстрее уменьшения длины свободного пробега с возрастанием температуры.

4. Число носителей тока не зависит от температуры, а подвижность их уменьшается с увеличением температуры.

IV. Чем характерен падающий участок вольт-амперной характеристики термосопротивления?

1. Падением напряжения на термосопротивлении с ростом тока.

2. Уменьшением тока с ростом напряжения на термосопротивлении.

3. При изменении силы тока напряжение на термосопротивлении практически остается неизменным.

4. Постоянством сопротивления термосопротивления.

V. Что такое постоянная времени τ термосопротивления?

1. Время, в течение которого сопротивление ТС увеличивается на 63% от первоначального.

2. Время, в течение которого температура ТС изменяется на 63% от разности температур ТС и окружающей среды.

3. Время, в течение которого ток через ТС изменяется на 63% от первоначального.

4. Время, в течение которого напряжение на ТС изменяется на 63% от первоначального.

VI. Каким выражением связан температурный коэффициент ТС с постоянной В?

1. $\alpha = -\frac{B}{T^2}$.

2. $\alpha = \frac{B}{R}$.

3. $\alpha = \frac{B}{T^2} R$.

4. $\alpha = \frac{B}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$.

B — постоянная ТС,
T — температура ТС,
R — сопротивление ТС.

VII. Каким выражением связаны постоянная «В» ТС с энергией активации ΔE полупроводника?

1. $B = \frac{\Delta E}{2kT}$.

2. $B = \frac{\Delta E}{T}$.

3. $B = \frac{\Delta E}{2k}$.

4. $B = \frac{\Delta E}{R}$.

к — постоянная Больцмана,
T — температура ТС,
R — сопротивление ТС.

VIII. Какой участок вольтамперной характеристики ТС используется при применении ТС в схемах измерения температуры, влажности воздуха?

1. Падающий участок вольтамперной характеристики.

2. Прямолинейный участок, когда изменение тока через ТС не влияет на напряжение на ТС.

3. Участок характеристики, на котором напряжение на ТС достигает максимального значения.

4. Линейный участок, на котором с достаточной степенью точности выполняется закон Ома.

IX. Какое свойство ТС позволяет использовать его как реле времени?

1. Зависимость сопротивления ТС от температуры.

2. Сила тока, проходящего по цепи ТС, является возрастающей функцией времени.

3. Зависимость сопротивления ТС от приложенного напряжения.

4. Зависимость сопротивления ТС от теплопроводности окружающей среды.

X. Каков принцип действия анемометра из полупроводника?

1. Зависимость температуры ТС от скорости обтекающего его потока воздуха.

2. Зависимость сопротивления ТС от теплопроводности окружающей среды.

3. Зависимость сопротивления ТС от силы тока, протекающего через него.

4. Зависимость сопротивления ТС от силы тока, протекающего через подогревательную спираль.

ПРОГРАММА № 12

к лабораторной работе «Изучение свойств германиевых и кремниевых диодов»

I. Какие примеси называют донорами?

1. Химически чистые примеси, обуславливающие собственную проводимость.

2. Примеси, создающие дырочную проводимость.

3. Примеси, у которых атомы отдают свои электроны.

4. Примеси, у которых атомы захватывают электроны и превращаются в отрицательные ионы.

II. Какие примеси называют акцепторами?

1. Примеси, у которых атомы отдают свои электроны и превращаются в положительные ионы.

2. Примеси, у которых атомы захватывают электроны.

3. Примеси, создающие электронную проводимость.

4. Примеси, создающие наполовину электронную и наполовину дырочную проводимость.

III. Что такое p-n переход?

1. Граничная область «р» и «n» полупроводников с пониженной концентрацией основных носителей.

2. Участок однородного полупроводника, через который проходит одинаковое количество электронов «n» и дырок «р».

3. Переход дырок в n-область и электронов в p-область.

4. Переход дырок в p-область и электронов в n-область.

IV. Каким выражением определяется величина потенциального барьера p-n перехода?

1. $U_к = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{P_n}$

2. $U_к = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_n}$

3. $U_к = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p}$

4. $U_к = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{P_p}$

k — постоянная Больцмана,

T — абсолютная температура,

e — заряд электрона,

n_n, P_n — концентрация электронов и дырок в электронной области.

n_p, P_p — концентрация электронов и дырок в дырочной области.

V. Чем объясняется ток насыщения при обратном напряжении на p-n переходе?

1. Ограниченным числом основных носителей в p и n-областях.

2. Током утечки через p-n переход.

3. Ограниченным числом быстрых электронов и дырок, способных преодолевать потенциальный барьер.

4. Ограниченным числом неосновных носителей в p и n — областях.

VI. Что положено в основу устройства кремниевого стабилитрона?

1. Односторонняя проводимость p-n перехода.

2. Явление пробоя p-n перехода.

3. Наличие тока насыщения через p-n переход.

4. Температурная зависимость обратного тока через p-n переход.

VII. В чем особенность p-n перехода у туннельного диода?

1. Большой потенциальный барьер и узкий обедненный слой.

2. Малый потенциальный барьер и широкий обедненный слой.

3. Большой потенциальный барьер и широкий обедненный слой.

4. Малый потенциальный барьер и узкий обедненный слой.

VIII. Что понимают под коэффициентом выпрямления?

1. $K = \frac{U_{об.}}{U_{пр.}}$

2. $K = \frac{U_{об.}}{J_{об.}}$

3. $K = \frac{J_{пр.}}{J_{об.}}$

4. $K = \frac{U_{пр.}}{J_{пр.}}$

$I_{пр}, U_{пр}$ — ток и напряжение в пропускном направлении p-n перехода,

$I_{об}, U_{об}$ — ток и напряжение в обратном направлении p-n перехода.

IX. Каким выражением определяется внутреннее сопротивление для прямого и обратного напряжения, приложенного к диоду?

В прямом направлении.

1. $R = \frac{\Delta U_{пр.}}{\Delta J_{пр.}}$

2. $R = \frac{U_{пр.}}{J_{пр.}}$

3. $R = \frac{U_{пр.}}{\Delta J_{пр.}}$

4. $R = \frac{\Delta U_{пр.}}{J_{пр.}}$

В обратном направлении.

1. $R = \frac{\Delta U_{об.}}{\Delta J_{об.}}$

2. $R = \frac{U_{об.}}{J_{об.}}$

3. $R = \frac{U_{об.}}{\Delta J_{об.}}$

4. $R = \frac{\Delta U_{об.}}{J_{об.}}$

X. Какой максимальный допустимый выпрямленный ток и максимально допустимое обратное напряжение для диода ДГЦ-27 (Д7Ж)?

1. 300 ma, 50 в.
2. 100 ma, 400 в.
3. 100 ma, 300в.
4. 300 ma, 200 в.

ПРОГРАММА № 13

к лабораторной работе «Изучение фотоэлектрических свойств полупроводниковых фотосопротивлений и фотоэлементов»

I. Что понимают под равновесной концентрацией носителей тока в полупроводниках?

1. Концентрацию электронов и дырок, которая имеется в полупроводнике в состоянии теплового равновесия.

2. Концентрацию носителей тока, возникающих под действием внешних факторов (свет, электрическое поле и т. п.).

3. Концентрацию носителей тока в условиях равновесия потока основных носителей с потоком неосновных носителей, идущих в противоположных направлениях.

4. Концентрацию носителей тока, возникших в полупроводнике не в результате термической (тепловой) ионизации.

II. Какие носители тока называются неравновесными?

1. Носители тока, возникающие в результате термической ионизации.

2. Носители тока, за счет которых протекает ток во внешней цепи.

3. Носители тока (электроны) в зоне проводимости.

4. Носители тока (электроны и дырки), возникшие под действием временных внешних факторов (свет, электрическое поле и т. п.).

III. По какой формуле определяется красная граница фотопроводимости «λ_{mx}» для собственных полупроводников, при котором свет является фотоэлектрически активным?

1. $\lambda_{mx} = \frac{h\nu}{\Delta E_0}$

2. $\lambda_{max} = \frac{\Delta E_0}{hc}$

3. $\lambda_{mx} = \frac{ch}{\Delta E_0}$

4. $\lambda_{mx} = \frac{hc}{F}$

h — постоянная Планка,

ν — частота света,

ΔE — ширина запрещенной зоны полупроводника,

c — скорость света,

F — энергия, соответствующая уровню Ферми.

IV. В чем особенности примесной фотопроводимости?

1. Коэффициент поглощения не зависит от интенсивности освещения, λ_{mx} сдвинута в сторону коротких волн относительно собственной фотопроводимости.

2. Коэффициент поглощения уменьшается с ростом интенсивности освещения, λ_{mx} фотопроводимости сдвинута относительно собственной в сторону длинных волн.

3. Коэффициент поглощения увеличивается с ростом интенсивности освещения, λ_{mx} фотопроводимости сдвинута в сторону длинных волн относительно собственной фотопроводимости.

4. Коэффициент поглощения не зависит от интенсивности освещения, λ_{mx} сдвинута в сторону длинных волн относительно собственной фотопроводимости.

V. Что представляет собой потенциальный барьер на p-n переходе?

1. Скопление ионизированных атомов примесей (доноров и акцепторов) по обеим сторонам границы соприкосновения p и n полупроводников (в p-области отрицательные ,ионы акцепторов, в n-области положительные ионы доноров).

2. Скопление диффундирующих дырок и электронов в пограничной области p-n перехода.

(в p-области — электроны, в n-области — дырки).

3. Скопление неосновных носителей на границе p-n перехода (в p-области—электроны, в n-области—дырки).

4. Скопление избыточных носителей на границе p-n перехода (в n-области—электроны, в p-области—дырки).

VI. Чем обуславливается возникновение фотоэдс при освещении p-n перехода?

1. Возникновением избыточных носителей и увеличением потенциального барьера на p-n перехода.

2. Возникновением избыточных носителей, градиентом концентрации между освещенными и неосвещенными участками p-n перехода.

3. Возникновением разности температур между p-n переходом и концами p и n области.

4. Возникновением избыточных носителей и разделением их полем р-п перехода (электронов в п-область, дырок в р-область).

VII. Какими процессами в основном определяется постоянная времени фотосопротивлений и эдс фотоэлемента?

1. Процессами генерации пар (электрон — дырка) и значением квантового выхода при включении света.

2. Процессами диффузии носителей, временем пролета носителей.

3. Процессами рекомбинации при выключении света.

4. Процессами возбуждения носителей с примесных центров.

VIII. Каким выражением определяется максимальная интегральная чувствительность фотосопротивления?

1. $K_{mx} = \frac{\gamma_p}{\varphi}$

2. $K_{mx} = \frac{\gamma_p}{\varphi U} U_p$

3. $K_{mx} = \frac{\gamma_p}{\varphi_\lambda}$

4. $K_{mx} = c\varphi^{\alpha-1} U$

I_ϕ — фототок,

Ф — световой поток,

U — приложенное к фс напряжение,

U_p — допустимое рабочее напряжение,

α — коэффициент.

λ —коэффициент,

С — постоянная величина.

IX. Какую ширину запрещенной зоны должны иметь полупроводники, чтобы из них можно было создать наиболее эффективный фотоэлектрический преобразователь

солнечного излучения (максимуму излучения солнца соответствует энергия квантов 2,4 эв)?

1. $\triangle E_0 = 1{,}5$ эв.
2. $\triangle E_0 = 1{,}12$ эв.
3. $\triangle E_0 = 2{,}4$ эв.
4. $\triangle E_0 = 0{,}7$ эв.

X. Какие сопротивления, имеющиеся в реальном фотопреобразователе, не учитываются в эквивалентной схеме идеального фотопреобразователя?

1. Сопротивление нагрузки и шунтирующее сопротивление p-n перехода.
2. Сопротивление контактов и материала, из которого изготовлен фотопреобразователь.
3. Сопротивление контактов, материала, из которого изготовлен фотопреобразователь и сопротивления нагрузки.
4. Шунтирующее сопротивление фотопреобразователя (обратное сопротивление p-n перехода) и последовательное сопротивление фотопреобразователя (сопротивление контактов и самого полупроводникового материала, из которого изготовлен фотопреобразователь).

ПРОГРАММА № 14

к лабораторной работе «Изучение ферритов»

I. Каким выражением определяется магнитный момент контура с током?

1. $P_m = JH$
2. $P_m = JS$
3. $P_m = HS$
4. $P_m = \frac{JS}{H}$

P_m — магнитный момент,
I — сила тока в контуре,
S — площадь контура,
H — напряженность поля.

II. Чему равен орбитальный магнитный момент электрона?

1. $M = \frac{M_0}{n}$

2. $M = mVr$

3. $M = M_0 n$

4. $M = \frac{h}{2\pi} n$

M — орбитальный магнитный момент электрона,
M_0 — магнетон Бора ($0{,}927 \cdot 10^{-20}$ эрг/гаусс),
n — целое число (1, 2, 3.....),
m — масса электрона,
V — скорость вращения электрона,
r — радиус орбиты электрона,
h — постоянная Планка ($6{,}62 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек).

III. Чему равен магнитный спиновой момент электрона?

1. $M_s = \frac{h}{2\pi} M_0$

2. $M_s = \frac{nh}{2\pi}$

3. $M_s = \frac{he}{m}$

4. $M_s = M_0$

M_s — спиновой магнитный момент электрона,
M_0 — магнетон Бора,
h — постоянная Планка,
n — целое число (1, 2, 3....),
e — заряд электрона,
m — масса электрона.

IV. Что является элементарными носителями ферромагнетизма?

1. Электронные спины.
2. Молекулярные токи.

3. Магнитные моменты атомных ядер.

4. Орбитальные магнитные моменты электронов.

V. Чему равен вектор намагничивания?

1. Полному магнитному моменту атома (или молекулы).

2. Напряженности намагничивающего поля.

3. Магнитному моменту единицы объема магнетика.

4. Напряженности, создаваемой молекулами намагниченного вещества.

VI. В результате действия каких сил возникает спонтанная намагниченность?

1. Обменных сил электрического происхождения.

2. Сил магнитного происхождения (внутренних).

3. Сил магнитного происхождения (внешних).

4. Ядерных сил атомов и молекул.

VII. Какие опытные факты подтверждают существование областей спонтанной намагниченности?

1. Изменение размеров и формы образца при наложении магнитного поля (магнитострикция).

2. Скачкообразное изменение намагниченности ферромагнетика при плавном нарастании магнитного поля, образование на хорошо отполированной поверхности ферромагнетика узлов (Акулова-Бихтера фигур).

3. Изменение электросопротивления ферромагнетика при внесении его в магнитное поле (гальваномагнитные явления).

4. Изменение термоэлектродвижущей силы при намагничивании ферромагнетика (термомагнитный эффект).

VIII. Что показывает петля гистерезиса магнитного материала?

1. Зависимость магнитной проницаемости от величины намагничивающего поля.

2. Зависимость коэффициента намагничения от напряженности поля.

3. Зависимость индукции B (или намагничения P) от напряженности намагничивающего поля H.

4. Зависимость индукции B от напряженности H, создаваемой молекулами намагниченного вещества.

IX. Какое свойство ферритовых сердечников является физической основой для использования их в качестве элементов запоминающих устройств.

1. Высокое удельное сопротивление.

2. Зависимость магнитной проницаемости феррита от частоты приложенного поля.

3. Узкая петля гистерезиса (малая коэрцитивная сила).

4. Прямоугольная петля гистерезиса (наличие двух устойчивых состояний).

X. Какая характеристика феррита, используемого в приемных антеннах, имеет наибольшее значение?

1. μ — магнитная проницаемость феррита при очень малых значениях напряженности намагничивающего поля.

2. μ_{mx} — максимальная проницаемость при больших напряженностях поля.

3. Площадь петли гистерезиса, характеризующая магнитные потери.

4. Коэрцитивная сила феррита.

ПРОГРАММА № 15

к лабораторной работе «Изучение работы счетчика Гейгера-Мюллера»

I. Каким выражением связаны ток насыщения $I_н$ ионизационной камеры с числом пар ионов N, возникающих в камере за единицу времени (ионизационный эффект)?

1. $\mathcal{J}_н = q_e N^2$

2. $\mathcal{J}_н = q_e N$

3. $\mathcal{J}_н = \frac{q_e}{N}$

4. $\mathcal{J}_н = q_e (N-1)$

q — заряд иона.

II. Какой разряд используется в пропорциональных счетчиках для усиления ионизации (сигнала)?

1. Самостоятельный разряд.

2. Тлеющий разряд.

3. Несамостоятельный разряд.

4. Коронный разряд.

III. Какую общую особенность имеют несамогасящие и самогасящие счетчики?

1. Используют одинаковый механизм разряда.

2. Имеют одинаковую продолжительность и форму импульса.

3. Используют несамостоятельный разряд.

4. Используют самостоятельный газовый разряд.

IV. Какие характерные особенности гасящей примеси в самогасящихся счетчиках?

1. Наличие широкой области поглощения ультрафиолетового узлучения, ионизационной потенциал гасящей примеси меньше ионизационного потенциала основного газа.

2. Наличие широкой области поглощения инфракрасного излучения, ионизационный потенциал примеси больше ионизационного потенциала основного газа.

3. Наличие широкой области поглощения видимого света, равенство ионизирующих потенциалов гасящей примеси и основного газа.

4. Малое время жизни возбужденных молекул гасящей примеси и большая плотность гасящей примеси.

V. Чем определяется мертвое время счетчика?

1. Временем движения электронов от места возникновения до анода.

2. Временем движения положительных ионов от места возникновения до катода.

3. Временем движения положительного пространственного заряда от нити на некоторое критическое расстояние.

4. Временем движения положительного пространственного заряда от критического расстояния до катода.

VI. Какие причины вызывают старение (выход из строя) самогасящего счетчика?

1. Распад гасящей примеси и изменение поверхности катода.

2. Распад молекул газа и изменение поверхности анода.

3. Соединение гасящей примеси с основным газом.

4. Поглощение катодом гасящей примеси и диссоциация основного газа.

VII. Каковы характерные особенности галогеновых гасящих примесей, примененных в галогеновых счетчиках?

1. Повышают потенциал зажигания счетчика, поглощают фотоны, ликвидируют метастабильные состояния основного газа.

2. Снижают потенциал зажигания самостоятельного разряда, поглощают фотоны, образующиеся в процессе разряда.

3. Реагируют с основным газом и повышают потенциал зажигания счетчика.

4. Испускают фотоны ультрафиолетового излучения и имеют потенциал ионизации выше потенциала возбуждения метастабильного состояния основного газа.

VIII. Почему галогеновый счетчик можно применять для измерения излучений большой активности?

1. Вследствие способности галогенов быстро распадаться на отдельные нейтральные атомы под действием излучения.

2. Вследствие способности галогенов снимать возбуждения метастабильных состояний основного газа.

3. Вследствие способности галогенов быстро восстанавливаться в молекулы.

4. Вследствие способности галогенов поглощать кванты света (фотоны).

IX. Какое явление положено в основу устройства прибора для измерения плотности жидкости с помощью галогеновых счетчиков?

1. Зависимость ионизации исследуемой жидкости γ излучением от плотности жидкости.

2. Зависимость люминесценции исследуемой жидкости под действием γ-лучей от плотности жидкости.

3. Увеличение интенсивности γ-излучения исследуемой средой с увеличением плотности жидкости.

4. Ослабление интенсивности γ-излучения исследуемой средой с увеличением плотности жидкости.

X. На каком принципе работают толщиномеры с газоразрядными счетчиками для измерения толщины тонких покрытий?

1. На принципе обратного рассеивания (отражения) β-частиц.

2. На принципе поглощения β-частиц.

3. На принципе когерентного рассеяния γ-лучей.

4. На принципе некогерентного рассеяния рентгеновских лучей.

Г. Г. ТРУЗИН, В. И. ПОЛИКАРПОВ

КАРМАННЫЙ ЭКЗАМЕНАТОР

Перед учителем советской школы на современном этапе стоит весьма важная и ответственная задача повышения эффективности процесса обучения. Опыт и практика показывают, что эффективность учебного процесса значительно повышается, если достаточно хорошо улучшить контроль за усвоением учащимися знаний по различным дисциплинам.

Однако учителю часто бывает трудно осуществить надлежащий контроль, он не всегда отчетливо представляет себе, какие знания и навыки приобретены учащимися в период сообщения нового материала, как усвоен материал обучаемыми и в каком объеме. Все это приводит к тому, что громадная часть времени на уроке расходуется для проведения устного опроса, различного рода самостоятельные и контрольные работы.

Применение элементов программированного обучения, в частности, различных контролирующих машин и устройств, активизирующих мышление учащихся, способствует облегчению и разрешению этой задачи.

В настоящее время большое распространение в вузах и школах страны получили электронные контролирующие устройства и машины — «Экзаменатор», «Коростень», «ПТ-2», «КУ-4», «Ласточка» и многие другие. Однако, несмотря на их достоинства, все электронные устройства имеют ряд существенных недостатков, к числу которых, на наш взгляд, следует отнести, во-первых, наличие дорогих дефицитных деталей и материалов (реле, электронные лампы, диоды, преобразователи напряжения и т. д.). Такие детали и материалы не всегда может приобрести школа, в особенности сельская. Вторым существенным

недостатком следует считать сложность конструкции электронных контролирующих устройств и их не всегда надежная работа.

Нами разработано простейшее контролирующее устройство — карманный экзаменатор «Квант» (рис. 1),

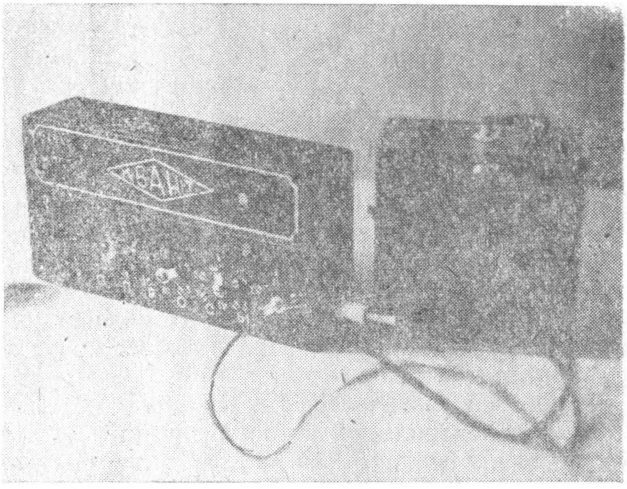


Рис. 1

который исключает указанные недостатки и, в то же время, дает такой же результат в применении. Карманный экзаменатор работает надежно и может найти широкое применение при проверке знаний учащихся. Мы используем его для проверки готовности студентов к выполнению ими лабораторных работ по курсу общей физики, а также для проведения зачетов и контрольных работ. Экзаменатор вполне доступен для изготовления силами учащихся под руководством учителя на кружковых занятиях.

Карманный экзаменатор представляет собой устройство настольного типа, предназначенное для автоматизации опроса учащихся на различных стадиях процесса обучения.

Экзаменатор «Квант» имеет габариты 137×70×32 мм, весит около 180 г и стоит 1 руб. 50 коп. Схема его показана на рис. 2, а внешний вид на рис. 1, 3, 4. Все детали экзаменатора самодельные (кроме лампочки и футляра).

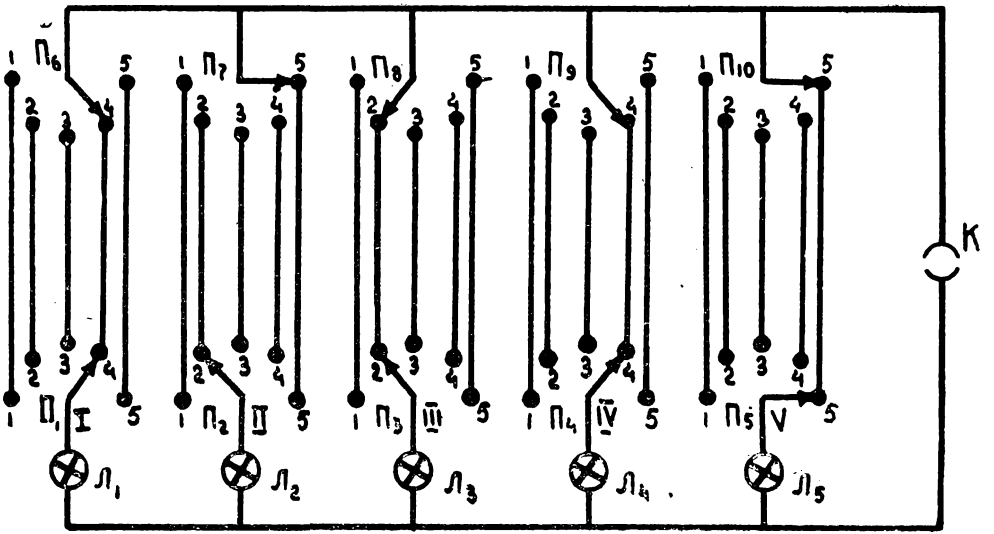


Рис. 2

Особенностью конструкции является отсутствие источника питания внутри футляра. Для питания любого количества экзаменаторов используется один блок питания с батарейкой от карманного фонаря, который может включаться к любому экзаменатору с помощью гибкого провода со штеккером на конце. Блок питания склеен из оргстекла и имеет габариты 80×75×25 мм, его общий вид изображен на рис. 1.

Корпус «Кванта» пластмассовый — коробка от шашек (имеется в продаже). Монтаж выполнен на гетинаксе толщиной 5 мм. В качестве контактов переключателей использованы стальные винты М-3. Ползунки изготовлены из упругой гартованной латуни (пластины контактов от реле). Фиксация положения переключателей осуществляется очень просто. Шлицы головок винтов-контактов располагаются радиально, а на той части ползунка, которая касается контактов, выдавлен с помощью зубильца выступ.

Пять переключателей, предназначенных для программирования, находятся под съемной крышкой из гетинакса. Крышка закрепляется одним винтом, может быть снята преподавателем очень быстро. Для этого нужна отвертка. Для учащихся же доступ к этим переключателям закрыт. На рис. 3 дан вид экзаменатора с закрытой,

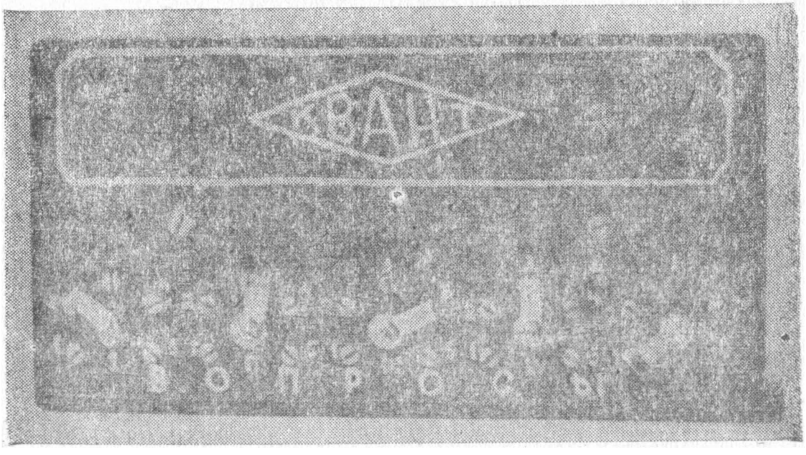


Рис. 3

а на рис. 4 — со снятой крышкой. Лампочки по 3,5 в. припаиваются к общему толстому проводу, являющемуся их держателем. Линзочки из цветного оргстекла вырезаны с помощью устройства, подобного пробочному сверлу с зубчиками, на сверлильном станке.

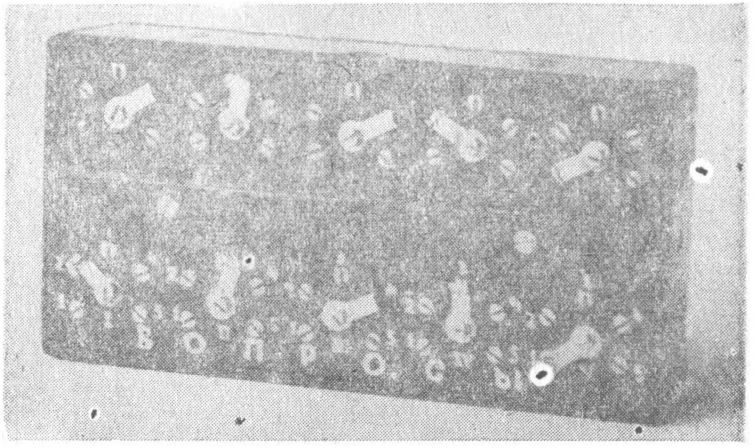


Рис. 4

Внутренний вид «Кванта» дан на рис. 5.

Контакты для включения штеккера блока питания смонтированы на боковой стенке футляра.

Карманный экзаменатор предназначен как для фронтальной проверки знаний учащихся по теоретическим предметам, так и для индивидуальной работы с отдельными учащимися.

Чтобы использовать экзаменатор на уроке или при проверке знаний отдельных учащихся, учитель заготавливает несколько программ с вопросами (в нашем экзаменаторе с пятью) на тему, по которой он хочет проконтролировать учащихся. Можно составить программы и по решению тех или иных задач. На каждый вопрос или задачу в программе дается пять ответов (по числу номеров переключателя), один из них правильный. Для удобства и быстрого подбирания правильных ответов учитель может в специальной тетради сделать нумерацию программ и положений рычажков верных ответов.

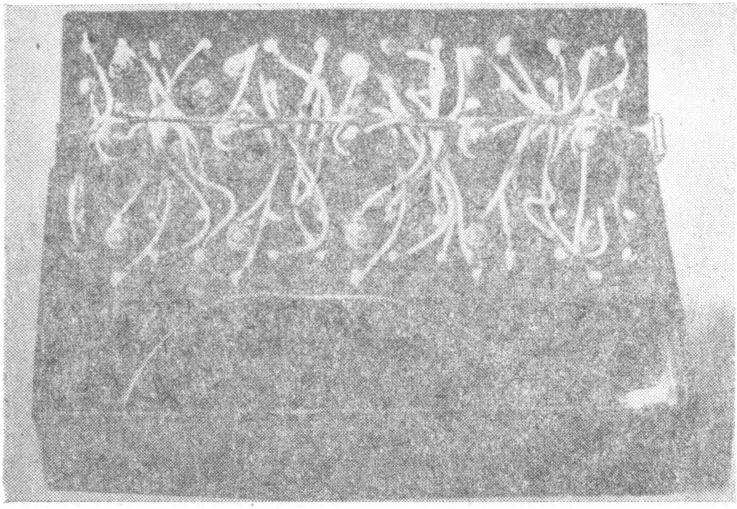


Рис. 5

Например:

№ программы или варианта	№ вопроса в программе	Номера правильных ответов
	1	4
	2	5
I	3	2
	4	4
	5	5

Таким образом, каждая программа имеет номер, обозначенный римской цифрой (I); этот же номер может обозначать номер варианта контрольной работы. Во втором столбце арабскими цифрами обозначаются номера вопросов в данной программе, правильные ответы на которые даются в следующем, третьем столбце.

Составив программы и подобную табличку, учитель быстро готовит экзаменатор к работе. Переключатели П6-П10 (см. рис. 2) устанавливаются на номера, соответствующие верным ответам (см. табличку и рис. 2) и за-

крываются крышкой. Теперь экзаменатор готов к работе, учитель раздает экзаменаторы и программы отвечающим, при этом источник питания оставляет у себя. Учащийся с карандашом и листком бумаги начинает готовиться с любого из пяти предложенных вопросов или задач. Получив ответ на один вопрос и сравнив свой ответ с пятью предложенными, ученик ставит переключатели П1-П5 в положение, соответствующее номеру правильного ответа. Затем ученик приступает к подготовке ответов на следующие вопросы и получает соответствующие результаты. По электрической схеме (рис. 2) видно, что на второй вопрос ученик ответил неправильно и потому лампочка Л2 не загорится, на остальные четыре вопроса ученик дал верные ответы. Закончив работу над заданием, ученик предупреждает учителя о готовности, учитель вставляет штеккер от источника питания в гнездо «К» экзаменатора, после чего загораются лампочки (по схеме рис. 2 Л1, Л3, Л4, Л5). Ученик видит результаты своей работы. По числу загоревшихся лампочек учитель судит о степени знаний учащегося по данной теме и выставляет соответствующую оценку.

Весьма существенным является качество составленных программ, подбор вопросов и ответов.

Очень важно, чтобы при выборочном методе все предлагаемые ответы были правдоподобными и не содержали принципиально ложной информации, которая могла бы удержаться в памяти как правильная. Важно также, чтобы была исключена возможность механического заучивания правильных ответов. Это достигается обычно большим количеством вариантов вопросов и программ по проверяемой теме.

Ц. М. РАБИНОВИЧ, О. Н. МУРАДОВА

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Глава из учебного пособия «Оптика» с программой самоконтроля

ОТ АВТОРОВ

Предлагаемый курс лекций рассчитан на самостоятельную работу студентов. Учебный материал в нем четко разделен на отдельные дозы информации «И», сопровождаемые программами самоконтроля.

Задания для самоконтроля даются после каждой дозы информации на левой стороне страницы. Здесь же на правой стороне страницы приводится несколько ответов, из которых необходимо выбрать верный. Иногда верных ответов два или больше.

В конце одного-двух разделов программы даются сводные ответы, по которым можно себя проконтролировать. Здесь же анализируются причины ошибок, указывается страница данного пособия, к которой нужно вернуться, либо страница учебника, где лучше всего изложен вопрос. Кроме определенных страниц данного курса, рекомендуются учебники:

Н. В. Кашин «Курс физики», т. 3, изд. 1956 г. (обозначение — К), К. А. Путилов и В. А. Фабрикант «Курс физики», т. 3, изд. 1963 г. (обозначение — П), С. Э. Фриш и А. В. Тиморева «Курс общей физики», т. 3, изд. 1952 г. обозначение — ФиТ), Г. С. Ландсберг «Элементарный курс физики», ч. 3, изд. 1957 г. (обозначение — Л).

Дозы информации имеют последовательную нумерацию от U_1 до U_{50}.

В номере каждого задания 3, номер информации отделяется от номера задания запятой.

Так $З_{11,4}$ означает: задание 4 к информации № 11.

Номер решения Р состоит из трех номеров: номера информации, который стоит слева от запятой. (Этот номер может быть и однозначным, и двухзначным). Справа от запятой стоят только две цифры. Первая из них означает номер задания, а вторая—номер решения Так, например, $Р_{11,03}$ означает решение № 3 к заданию № 4 информации № 11. $Р_{21,45}$ означает решение № 5, к заданию № 4, к информации № 21.

Получение верного ответа по всем заданиям данной информации служит доказательством того, что можно переходить к изучению следующей информации.

В предлагаемом курсе лекций изложены все вопросы программы, но он, как и устный курс лекций, рассчитан на то, что студент будет пользоваться и учебниками. Ряд заданий составлен специально так, чтобы обращение к учебнику стало необходимостью.

Здесь предлагается один раздел учебника, посвященный дифракции. В предлагаемом пособии этот раздел охватывает пять доз информацией $И_6$--$И_{10}$. Нумерация доз информаций, заданий, решений и рисунков оставлены без изменений.

$И_6$. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Дифракцией света мы называем явление огибания светом преград или явление проникновения света за границу своей геометрической тени

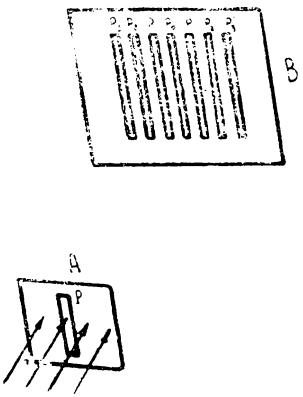


Рис. 15.

Пусть свет проходит через прямоугольную щель Р в экране А. (рис. 15). Если щель достаточно широка, то на экране В мы получим освещенное геометрически подобное изображение щели Ро. Если начать сужать щель Р, то ее изображение Ро тоже будет уменьшаться. Но если щель сделать очень узкой, тогда на экране В наряду с центральным или «нулевым» появятся еще изображения, расположенные попарно симметрично относительно цен-

тралыного изображения. Это и будет дифракционная картина щели.

Светлые изображения щели называются дифракционными максимумами. В белом свете все максимумы, за исключением Ро, спектрально окрашены.

Объяснить явление дифракции можно только с точки зрения волновой теории, основной принцип которой был сформулирован Х. Гюйгенсом в его «Трактате о свете», изданном в 1670 г. **Принцип Гюйгенса: каждая точка фронта волны является источником сферической элементарной волны. Огибающая, построенная для этих элементарных волн в любой момент времени, представляет собой фронт волны в этот момент времени.** Пусть NN представляет собой фронт волны в момент времени t_1 (рис. 16). Если волна распространяется в однородной среде, а источник точечный, то фронт волны—сфера. Из каждой точки этой сферической поверхности радиуса R_1 выходят как из центров, новые сферические элементарные волны. За время Δt каждая из них распространится на радиус $r_1 = v : \Delta t$, где v — скорость света в данной среде. К моменту времени $t_2 = t_1 + \Delta t$, фронт волны представляет собой сферу радиусом $R_2 = R_1 + r_1$

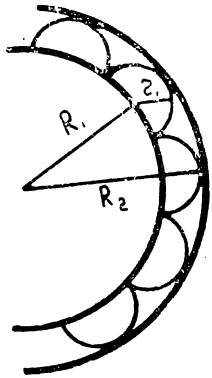


Рис. 16.

Из каждой точки новой сферы снова выходят элементарные сферические волны и т. д.

Наглядно подтверждает принцип Гюйгенса картина дифракции волн на поверхности воды. (Рис. 17). Здесь на пути плоской волны установлен экран с небольшим отверстием. Оно может рассматриваться как точка фронта волны, из которой выходит сферическая волна.

Принцип Гюйгенса раскрывает механизм распространения волн. С его помощью можно легко объяснить законы отражения и преломления света, но он не объясняет прямолинейности распространения света. Противники волновой теории Гюйгенса ставили вопрос так: если из точечного источника света распространяется сферическая волна, то почему мы никогда не видим сферической волно-

вой поверхности. Ответ на этот вопрос был дан только в начале XIX века Френелем, который дополнил принцип Гюйгенса методом зон.

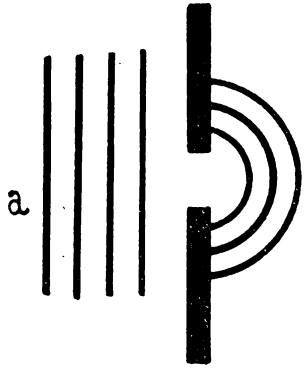


Рис. 17.

ПРОГРАММА САМОКОНТРОЛЯ К $И_6$

Задания	Решение
$З_{6,1}$. Что называется дифракцией света?	$Р_{6,11}$. Дифракция — это наложение световых волн друг на друга. $Р_{6,12}$. Дифракция — огибание светом преград или проникновение света в область геометрической тени.
$З_{6,2}$. В каких случаях можно наблюдать дифракцию света?	$Р_{6,21}$. Дифракцию света можно наблюдать в тех случаях, когда размеры препятствий соизмеримы с длиной волны света. $Р_{6,22}$. Дифракцию света можно наблюдать в тех случаях, когда размеры препятствий значительно больше длины волны света.
$З_{6,3}$. Сформулируйте принцип Гюйгенса.	$Р_{6,31}$. Каждая точка фронта волны является источником элементарных сферических волн. Новый фронт является огибающей этих элементарных сферических волн.

И7. МЕТОД ЗОН ФРЕНЕЛЯ

Метод зон заключается в том, что поверхность фронта волны делится на такие участки или зоны, расстояние которых до наблюдателя отличается для двух соседних зон на $\frac{\lambda}{2}$. При этом свет, **доходящий до наблюдателя от двух соседних зон, будет иметь разность хода** $\delta = \frac{\lambda}{2}$ **и разность фаз** $\Delta\varphi = \pi$, **а это, по условиям интерференции, должно дать** минимум освещенности. То есть зоны строятся так, чтобы в точке наблюдения свет от двух соседних зон гасил друг друга. Естественно, что при этом площади этих зон должны быть равными и свет они должны давать одинаковой интенсивности.

Применим метод зон к наблюдателю, находящемуся в точке А, столь далекой от точечного источника света S, что сферический фронт волны на небольшом ее участке может быть принят за плоскость N (рис. 18).

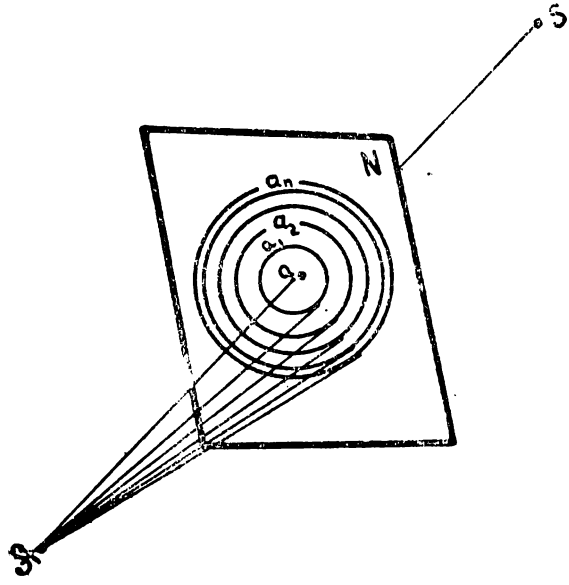


Рис. 18.

Прямая, соединяющая источник S с наблюдателем, пересекает фронт волны N в точке a_0.

Положим расстояние $Aa_0 = b$.

• Из точки A радиусом $Aa_1 = b + \frac{\lambda}{2}$ строим сферу.

Она вырежет из плоскости N круглую площадку радиусом $a_1 a_0$. Это будет первая зона Френеля.

Аналогично из точки A строим сферы радиусами.

$$Aa_2 = b + 2\frac{\lambda}{2}$$
$$Aa_3 = b + 3\frac{\lambda}{2}$$
$$\cdots\cdots\cdots$$
$$\cdots\cdots\cdots$$
$$Aa_{n-1} = b + (n-1)\frac{\lambda}{2}$$
$$Aa_n = b + n\frac{\lambda}{2}$$

Каждая из сфер пересекает фронт волны по окружности. Центральная зона Френеля будет окружена системой концентрических кольцеобразных зон убывающей ширины.

Покажем, что площади всех зон равны. В самом деле площадь n-ой зоны.

$$= \pi\left[(a_0a_n)^2 - (a_0a_{n-1})^2\right] = \pi\left[(Aa_n)^2 - b^2 - \right.$$
$$\left. - (Aa_{n-1})^2 + b^2\right] = \pi\left[(Aa_n)^2 - (Aa_{n-1})^2\right] =$$
$$\pi\left[b^2 + bn\lambda + \frac{n^2\lambda^2}{4} - b^2 - b(n-1)\lambda - (n-1)^2\frac{\lambda^2}{4}\right] =$$
$$\pi\left[b\lambda + (2n-1)\frac{\lambda^2}{4}\right]$$

Считая, что $\lambda \ll b$, пренебрегаем членами с λ^2. Тогда $S_n \cong \pi b\lambda$ (15).

Таким образом, площадь n-ой зоны не зависит от n и для всех зон одинакова.

Интенсивность света, идущего от зоны к наблюдателю, зависит от угла, под которым наблюдатель видит эту зону. По мере удаления зоны от центра интенсивность

света, идущего от нее к наблюдателю, падает. Можно считать, что интенсивность света каждой зоны равна среднему арифметическому от интенсивности света, идущего от двух соседних зон:

$$I_n = \frac{I_{n-1} + I_{n+1}}{2}.$$

Поэтому можно считать, что свет, идущий от какой-либо зоны к наблюдателю, погасится для него светом, идущим от половинок двух соседних зон. Например, свет, идущий от 6-й зоны, погасится светом от половины 5-й и половины 7-й зон. Половина 5-й зоны вместе с половиной 3-й погасят 4-ую. Половина 3-й и половина первой погасят вторую. В сторону увеличения номера зон все зоны до бесконечности будут погашены. Остается непогашенной 1/2 первой зоны Френеля. Ее-то свет дойдет до наблюдателя, как свет от точечного источника, так как площадь зоны очень мала.

Применение метода зон весьма широко. С его помощью можно объяснить дифракцию от малого круглого отверстия, малого круглого экрана, узкой щели бесконечной длины. Если в первых двух случаях имеет место дифракция в сходящихся лучах, то через узкую щель выходят пучки параллельных лучей, которые надо фокусировать. Поэтому различают дифракцию в сходящихся лучах (дифракция Френеля) и дифракцию в параллельных лучах (дифракция Фраунгоффера).

ПРОГРАММА САМОКОНТРОЛЯ К И.

Задания	Решения
$З_{7,1}$. Какие изменения внес Френель в принцип Гюйгенса?	$Р_{7,11}$ Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением об интерференции вторичных волн.
$З_{7,2}$ Почему Френель выбрал расстояние от двух соседних зон до точки наблюдения равным именно $\frac{\lambda}{2}$?	$Р_{7,21}$ При расстоянии от двух соседних зон до точки наблюдения $\frac{\lambda}{2}$ лучи приходят от них в эту точку в противоположных фазах и ослабляют друг друга вследствие интерференции. Исходя из этого, Френель сумел удовлетворительно

обяснить прямолинейное распространение света и дифракционные явления.

$З_{7,3}$ Зависит ли площадь зон Френеля от номера зоны? Напишите формулу для площади зон Френеля.

$Р_{7,31}$ Зависит, $S_n = \pi b_n \lambda$, где b_n — расстояние от n — зоны до точки наблюдения.

$Р_{7,32}$. Не зависит, $Sn = b\tau\lambda$, где b — расстояние от точки наблюдения до фронта волны.

$З_{7,4}$ Точечный источник света имеет сферический фронт волны. Почему вместо светящейся сферы мы видим источник света в виде точки?

$Р_{7,41}$ Фронт волны разбивается на зоны Френеля, интенсивность света 2-х соседних зон одинакова. В точке наблюдения происходит гашение света, идущего от двух соседних зон. Непогашенным остается свет от центральной зоны, поэтому источник света виден в виде точки.

$Р_{7,42}$ Фронт волны разбивается на зоны Френеля. Площади зон равны, но интенсивность света от зон убывает с увеличением номера зоны. Поэтому свет от каждой зоны гасится светом от 1/2 предыдущей и 1/2 последующей зоны. В точке наблюдения остается свет от 1/2 центральной зоны, а свет от остальных зон оказывается погашенным вследствие интерференции. Поэтому источник света виден в виде точки.

$З_{7,5}$ Вычислить радиусы первых 3-х зон Френеля для случая плоской волны. Расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1 м. Длина волны $\lambda = 5{,}10^{-7}$ м.

$Р_{7,51}$. $r_1 = r_2 = r_3 = r = 0{,}71$ мм

$Р_{7,52}$ $r_1 = 2{,}24$ мм; $r_2 = 1$ мм; $r_3 = 1{,}23$ мм.

$Р_{7,53}$ $r_1 = 0{,}71$ мм; $r_2 = 1$ мм; $r_3 = 1{,}23$ мм.

$З_{7,6}$ Вычислить радиусы первых 3-х зон Френеля, если расстояние от источника волн до волновой поверхности равно 1 м, расстояние от волновой поверхности до точки наблюдения также равно 1 м и $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м

$Р_{7,61}$ $r_1 = 0{,}5$ мм; $r_2 = 0{,}71$ мм; $r_3 = 0{,}86$ мм.

$Р_{7,62}$ $r_1 = 1$ мм; $r_2 = 1{,}41$ мм; $r_3 = 1{,}73$ мм.

$Р_{7,63}$ $r_1 = 0{,}71$ мм; $r_2 = 1$ мм; **$r_3 = 1{,}23$ мм.**

И. ДИФРАКЦИЯ В СХОДЯЩИХСЯ ЛУЧАХ

Маленькое круглое отверстие

Свет падает нормально на поверхность плоского экрана, в котором имеется малое круглое отверстие (рис. 19).

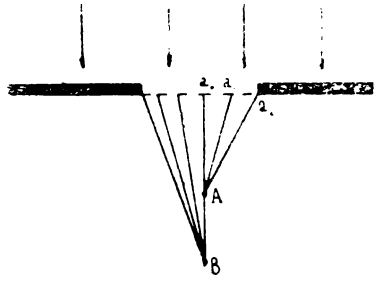


Рис. 19.

С точки зрения наблюдателя A строим на плоскости отверстия зоны Френеля.

$$Aa_0 = b; \quad Aa_1 = b + \frac{\lambda}{2};$$

$$Aa_2 = b + 2\frac{\lambda}{2}; \quad \ldots \quad Aa_n = b + n\frac{\lambda}{2}.$$

Если количество зон будет четным, они погасят друг друга. Если же (как, например, для наблюдателя в точке B) число зон получается нечетным, одна «лишняя» зона дает свет и наблюдатель его увидит. Поместив в точке B экран, получим на нем дифракционную картину. Она будет состоять из концентрических колец светлых — максимумов и темных — минимумов. В центре картины в точке B будет максимум. Если же экран переместить в точку A, то в центре картины будет темное пятно — минимум.

Маленький круглый экран

Свет падает нормально на маленький круглый экран. Что увидит наблюдатель в точке A на прямой, перпендикулярной к центру экрана? Оказывается, что в этой точке (рис. 20) всегда будет максимум дифракции. В цент-

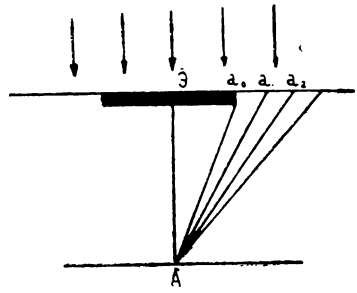


Рис. 20.

ре геометрической тени, которую дает маленький экран Э, всегда будет светлое пятно. Это объясняется тем, что построив из точки А систему зон на бесконечном фронте волны, простирающемся от экрана Э во все стороны до бесконечности и применив метод Френеля, мы увидим, что свет от каждой зоны будет гаситься в точке А светом от половин двух соседних зон. Остается непогашенным свет, идущий от половины первой зоны Френеля, прилегающей к экрану. Метод построения зон здесь такой же, как прежде. Расстояние $Aa_0 = b$; $Aa_1 = b + \frac{\lambda}{2}$;

$$Aa_2 = b + 2\frac{\lambda}{2} \ldots \quad Aa_n = b + n\frac{\lambda}{2}.$$

ПРОГРАММА САМОКОНТРОЛЯ К $И_8$

Задания	Решения
$З_{8,1}$ Будет ли меняться освещенность **центра экрана, на котором** наблюдается дифракционная картина от маленького круглого отверстия, если **приближать** или удалять экран от отверстия?	$Р_{8,11}$. Освещенность центра дифракционной картины не будет меняться при перемещении экрана относительно отверстия. $Р_{8,12}$. Освещенность центра дифракционной картины меняется при перемещении экрана, относительно отверстия. При некоторых расстояниях между экраном и отверстием в центре дифракционной картины наблюдается максимум освещенности, при некоторых других — мини-

мум. Это объясняется тем, что число зон Френеля, укладывающихся в данном отверстии, непостоянно, а зависит от расстояния между экраном и отверстием.

$Р_{8,21}$ r=0,71 мм.

$Р_{8,22}$ r=0,03 мм.

$Р_{8,23}$ r=1 мм.

$З_{8,2}$ Экран АА находится на расстоянии 4 м от монохроматического источника света. Посередине между экраном и источником света помещен экран ВВ с круглым отверстием. При каком радиусе отверстия центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране АА, будет наиболее темным? Длина волны источника света $\lambda=5\cdot10^{-4}$ мм.

$З_{8,3}$ Какова освещенность центра экрана, на котором наблюдается дифракционная картина от малого круглого экрана?

$Р_{8,31}$. В центре дифракционной картины от малого круглого экрана наблюдается минимум или максимум освещенности в зависимости от числа зон Френеля, которое закрывает экран на данном расстоянии.

$Р_{8,32}$ В центре дифракционной картины от малого круглого экрана всегда наблюдается максимум освещенности. Объясняется это при помощи метода зон Френеля: освещенность в центре картины создается половиной первой зоны, непосредственно примыкающей к экрану. Свет от остальных зон Френеля гасится вследствие интерференции.

$Р_{8,41}$ l=83,5 м.

$Р_{8,42}$ l=167 м.

$З_{8,4}$ Экран АА находится на расстоянии l от монохроматического источника света ($\lambda=6\cdot10^{-5}$ см). Посередине между ними помещен круглый непрозрачный экран ВВ диаметром 1 см. Чему равно расстояние l, если экран ВВ закрывает только центральную зону Френеля?

И$_9$. ДИФРАКЦИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛУЧАХ

а) Дифракция от узкой длинной щели

Пусть в экране, на который падает нормальный поток света, имеется щель ширины a (рис. 21). Пройдя через

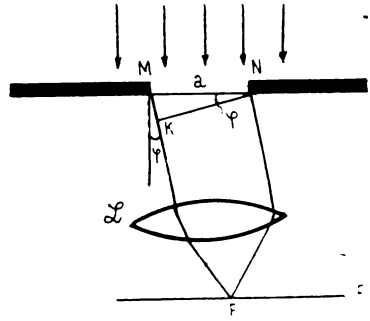


Рис. 21.

эту щель, свет дифрагирует или рассеивается во все стороны. При этом свет заходит за границу геометрической тени щели (см. И$_8$, рис. 17). Ведь каждую точку фронта волны по принципу Гюйгенса следует считать центром вторичной сферической волны. Поэтому из каждой точки щели свет идет во всевозможных направлениях, а не только в направлении, нормальном к щели.

Линза L собирает в разных точках фокальной плоскости пучки лучей, выходящих из щели под определенным углом и направленных параллельно друг другу.

Пусть в точке F_1, сходятся лучи, образующие угол φ с нормалью. Задача заключается в том, чтобы исследовать, в каких точках фокальной плоскости расположены максимумы, или светлые изображения щели. **Это зависит от того, четное или нечетное число зон Френеля уложится в щели с точки зрения наблюдателя, помещенного в данную точку фокальной плоскости.**

Для определения числа зон Френеля, которое укладывается в щели, строим фронт волны, проходящий через крайнюю точку щели N. На рисунке фронт волны изображен перпендикуляром к ходу лучей Nk.

На отрезке МК откладываем $\frac{\lambda}{2}$. Легко понять, что сколько раз $\frac{\lambda}{2}$ отложится на отрезке МК, столько зон Френеля уложится в щели.

Отсюда условие максимума для щели выразится равенством,

$$a \sin\varphi = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \qquad (16)$$

так как здесь число зон должно быть нечетным.
Условие минимума соответственно будет

$$a \sin\varphi = 2k\frac{\lambda}{2}. \qquad (17)$$

б) Две узкие параллельные щели

Если свет проходит через две параллельные щели, то к условиям дифракции добавляются условия интерференции.

Кажется весьма удивительным, что участок экрана, который является освещенным при действии одной щели, становится неосвещенным при действии двух щелей. Именно этот факт гашения света от одной щели светом, идущим от другой щели, и объясняется интерференцией. Пусть ширина щелей а, расстояние между щелями равно в (рис. 22). Из щелей свет выходит по всевозможным направлениям. Линза собирает пучки параллельных лучей в фокальной плоскости. Исследуем, в каких точках фокальной плоскости получается максимум.

Поскольку щели имеют одинаковую ширину, а угол φ, под которым идут рассматриваемые пучки, тоже одинаков, обе щели дают сходные дифракционные картины.

В тех точках, которые соответствуют минимуму для каждой щели, получится минимум и для двух щелей. Ни одна из щелей не посылает в эти точки света, и они освещенными не будут. Но если взять точки, которые соответствуют условиям максимумов для каждой щели, то в них могут не получиться максимумы, если свет от двух щелей приходит в эти точки в противоположных фазах. Это зависит от разности хода между пучками лучей.

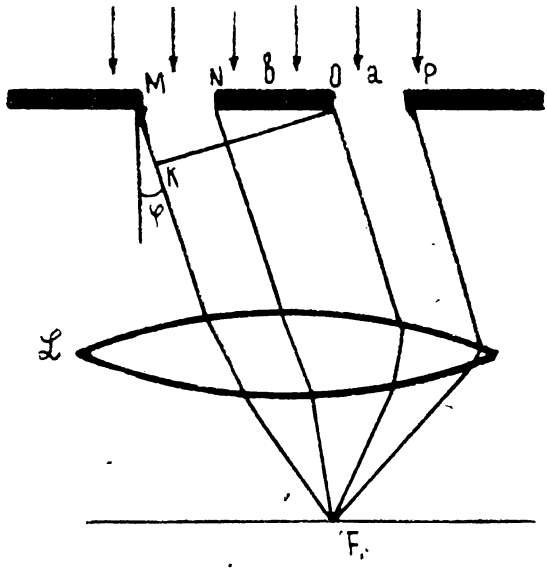


Рис. 22.

Чтобы найти эту разность хода проводим перпендикуляр ОК между крайними лучами световых пучков. Разность хода, по-видимому, равна $(a+в)\sin\varphi$.

Если в этой разности хода отложится четное число полуволн, или целое число волн, мы получим максимум. При нечетном числе полуволн получится минимум. Таким образом, для двух щелей имеем.

$$(a + в)\sin\varphi = к\lambda \quad \text{— условие максимума} \qquad (18)$$

$$a\sin\varphi = к\lambda \quad \text{— условие минимума.} \qquad (19)$$

$$(a + в)\sin\varphi = (2к + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{— условие дополнительных минимумов.} \qquad (20).$$

При переходе от максимума к ближайшему минимуму разность хода $(a + в)\sin\varphi$ должна измениться на $\frac{\lambda}{2}$.

ПРОГРАММА САМОКОНТРОЛЯ К $И_9$

Задания	Решения
$З_{9,1}$. Записать условия максимумов и минимумов для случая дифракции от узкой длинной щели.	$Р_{9,11}$ $a \sin \varphi = k\frac{\lambda}{2}$ —мин. $a \sin\varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ —макс. $Р_{9,12}$ $a\sin\varphi = k\lambda$ —мин. $a\sin\varphi = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ —макс.
$З_{9,2}$. На щель шириной $2\cdot10^{-3}$см падает нормально пучок монохроматического света с длиной волны $5\cdot10^{-5}$см. Найти ширину изображения щели на экране, удаленном от щели на $l=1$ м. Шириной изображения считать расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от главного максимума освещенности.	$Р_{9,21}$ $d = 12{,}5$ см. $Р_{9,22}$ $d = 2{,}5$ см. $Р_{9,23}$ $d=8\cdot10^3$ см $Р_{9,24}$ $d = 5$ см
$З_{9,3}$. На щель падает нормально параллельный пучок света. Длина волны падающего света укладывается в ширине щели 6 раз. Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум?	$Р_{9,31}$ $\alpha = 35°$ $Р_{9,32}$ $\alpha = 30°$
$З_{9,4}$. Как изменится дифракционная картина, если, вместо одной щели, взять 2 узкие параллельные щели?	$Р_{9,41}$. Дифракционная картина не изменится. $Р_{9,42}$. При двух щелях светлые полосы становятся уже и расположены они реже, чем при одной щели, т. к., кроме главных минимумов, появляются еще дополнительные минимумы в тех направлениях, где происходит гашение света от одной щели светом от другой щели вследствие интерференции.

И$_{10}$. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Дифракционная решетка представляет собой ряд параллельных узких щелей в непрозрачном экране. Ясно, что здесь мы тоже имеем дело с дифракцией в параллельных лучах. Принципиально этот случай ничем не отличается от случая двух щелей.

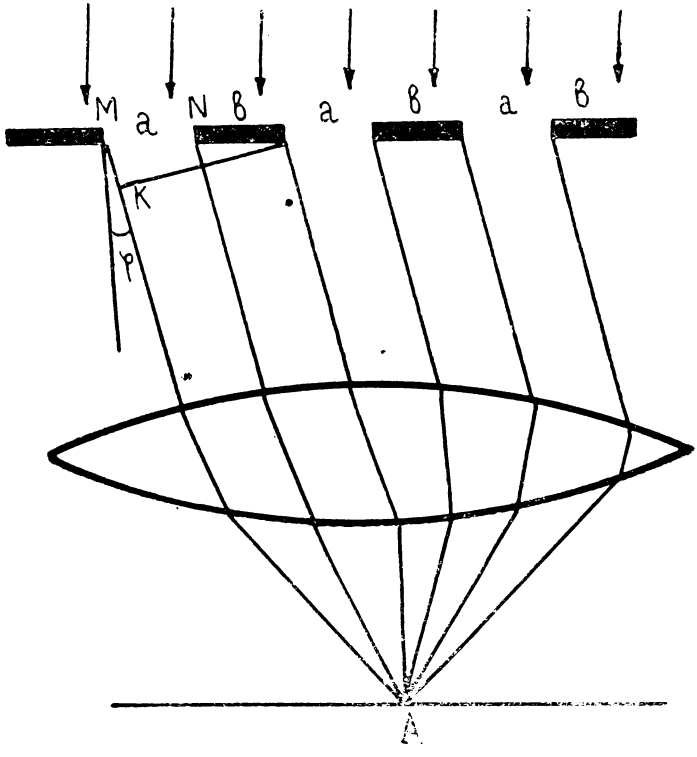


Рис. 23.

В самом деле. Пусть в точку экрана А попадает свет из N щелей одинаковой ширины a. Промежутки между ними тоже одинаковы и равны b. Расстояние $MN = a + b = d$ называется **постоянной решетки.**

МК — разность хода между двумя соседними пучками лучей, идущими под произвольным углом φ к нормали. Условия минимума для одной щели будет по-прежнему $a \sin\varphi = 2k \frac{\lambda}{2}$ (четное число зон Френеля). Очевидно, в этих точках имеет место минимум (главный) для какого угодно числа щелей, т. к. в данные точки экрана свет вовсе не приходит ни от одной щели. Условие главных максимумов остается таким же, что и для двух щелей.

$$(a+b)\sin\varphi = k\lambda$$

Этот результат мы получаем, рассматривая взаимодействие двух щелей попарно, потом четырех, восьми, шестнадцати щелей и т. д.

Условие главных максимумов остается тем же, число максимумов уменьшается. Много точек, которые были освещены при действии двух щелей, становятся не освещенными при действии четырех, восьми щелей. Таким образом, в точках, где были максимумы, возникают при увеличении числа щелей минимумы, которые называются дополнительными.

Чем больше число щелей, тем больше минимумов между двумя максимумами.

Как мы видели выше, при интерференции многих колебаний ($И_5$) переход от максимума к ближайшему минимуму требует изменения разности хода на $\frac{\lambda}{N}$. А при переходе к соседнему максимуму разность хода изменяется на λ. Отсюда число минимумов между двумя максимумами зависит от числа щелей и равно N—1.

Поскольку число максимумов уменьшается с возрастанием числа щелей, то по закону сохранения энергии интенсивность освещения максимумов возрастает. Сами же максимумы становятся уже. Интенсивность максимумов графически изображена на рис. 24. Здесь площади, охваченные кривыми, должны изображаться пропорциональными числу щелей, так как общая интенсивность света

пропорциональна числу щелей. Масштабы «а» и «б» рис. 24 различны.

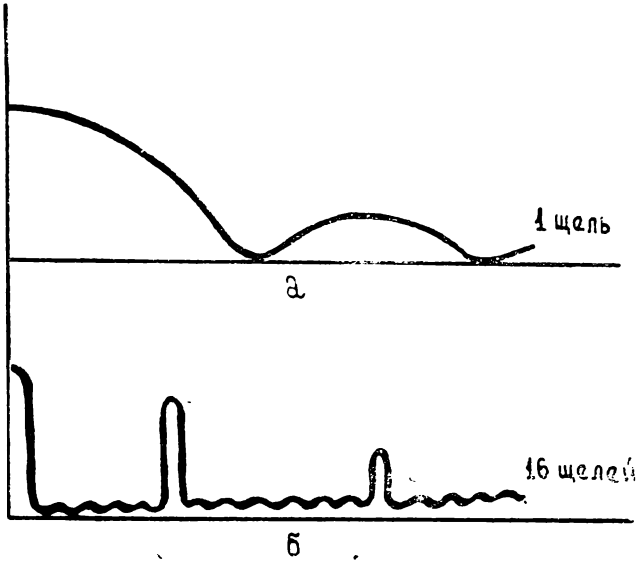


Рис. 24.

Спектр дифракционной решетки

Условия главных максимумов дифракционной решетки

$$(a + b)\sin\varphi = k\lambda \qquad k=0,\ 1,\ 2,\ \ldots \qquad \text{или}$$

$$d\sin\varphi = k\lambda \qquad (21)$$

Здесь k—целое число, означающее порядок спектра. При $k=0$, $(a+b)\sin\varphi = 0$ для всех длин волн. **Поэтому центральный или нулевой максимум дифракционной картины в белом свете будет белым.** Для всех же остальных максимумов разность хода зависит от длины волны. Максимумы для разных λ сдвинуты друг относительно друга. Вот почему **каждый максимум дифракционной решетки, кроме нулевого, представляет собой спектр тем более яркий, чем больше щелей в решетке.** Дифракционные решетки с большим числом щелей применяются для получения спектров.

Для изготовления дифракционной решетки берут прозрачную пластинку и с помощью особой делительной машины наносят на нее ряд строго параллельных царапин. Прозрачные промежутки между непрозрачными царапинами играют роль щелей.

Современные машины наносят сотни и тысячи царапин на один миллиметр длины решетки. Решетки с таким большим числом щелей используются для изучения сложных спектров, состоящих из спектральных линий, весьма близко лежащих друг к другу.

Дисперсия решетки

Пусть в точке A_1 экрана получается максимум К-го порядка для длины волны λ_1, полученный для угла φ_1 (рис. 25). Для длины волны λ_2 максимум этого же по-

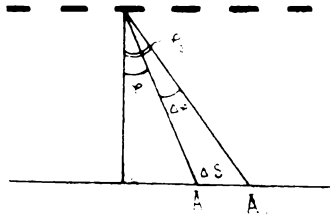


Рис. 25.

рядка будет виден под другим углом φ_2 и окажется в точке A_2. Чем больше угол $\varphi_2 - \varphi_1$ для данной разности длин волн $\lambda_2 - \lambda_1$, тем дальше друг от друга спектральные линии разных цветов в данной спектральной полосе, тем больше, говорят, дисперсия решетки. Величина $D = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}$ называется мерой дисперсии. Поскольку для максимумов имеет место $d\sin\varphi = k\lambda$, то отсюда, дифференцируя, получим:

$$d\cos\varphi\, d\varphi = k\, d\lambda; \qquad \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{d\cdot\cos\varphi}$$

Угловое расстояние заменяется линейным. $\Delta S = f\Delta\varphi$, где f — фокусное расстояние линзы, которая упущена на рис. 25 для простоты картины. Линейная дисперсия

$$D_л = Df = \frac{\Delta S}{\Delta\lambda} = f\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}.$$

Отсюда $$D_л = f\frac{k}{d\cos\varphi};$$

Дисперсия решетки пропорциональна порядковому номеру спектра и обратно пропорциональна постоянной решетки.

Качество решетки определяется не только ее дисперсией, но главным образом, ее разрешающей способностью, это значит способностью разрешить или раздельно показать две близколежащие друг к другу спектральные линии. Чем ближе две спектральные линии с длинами волн λ_1 и λ_2, которые с помощью данной решетки удается раздельно рассмотреть, тем больше разрешающая способность решетки. Мерой разрешающей способности служит величина $A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$. Легко понять, что в числителе может стоять и λ_1, поскольку $\Delta\lambda$ очень мало по сравнению с λ_1 и λ_2.

Правило Рэлея

Чтобы две спектральные линии были разрешены в максимуме данного порядка, необходимо, чтобы главный максимум одной из этих линий в данном порядке совпадал с первым минимумом для второй спектральной линии.

Пусть в максимуме m-го порядка спектральные линии λ_1 и λ_2 имеют максимумы, тогда имеет место

$d\sin\varphi_1 = m\lambda_1$ — условие максимума для λ_1,

$d\sin\varphi_2 = m\lambda_2$ — условие максимума для λ_2,

минимум для второй линии (ближайший для ее максимума) должен удовлетворять условию $d\sin\varphi = m\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{N}$, где N — число щелей решетки (см. $И_5$).

По условию Рэлея этот минимум должен совпадать с максимумом первой линии. Это значит, что $\varphi = \varphi_1$.

Отсюда имеем:

$$d \sin\varphi_1 = m\lambda_1$$

$$d\sin\varphi_1 = m\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{N}.$$

Сравнивая правые части этих уравнений, получаем

$$m\lambda_1 = m\lambda_2 + \frac{\lambda_2}{N}; \quad \text{отсюда} \quad A = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = mN. \qquad (23)$$

Разрешающая способность решетки пропорциональна порядковому номеру спектра и общему числу щелей решетки. Именно поэтому стремятся увеличить не только частоту решетки, $n = \frac{1}{d}$, но и длину решетки l. За этот счет добиваются увеличения общего числа щелей $N = ln = \frac{l}{d}$.

Последние образцы советских дифракционных решеток, выставленные в павильоне «Оптика» на ВДНХ, имеют длину свыше 10 см. Общее число щелей в них достигает многих тысяч. Разрешающая способность этих решеток очень велика.

Дифракция возможна не только на твердых решетках. Можно, например, создать своеобразную решетку, пропуская ультразвуковые волны через жидкость. В жидкости при этом образуются периодические сгущения и разрежения, что приводит к периодическому изменению коэффициента преломления. Постоянную этой «решетки» определяет частота генератора ультразвука. При постоянной частоте генератора длина звуковой волны зависит от скорости распространения ультразвука в данной среде $\lambda = \frac{v}{\nu}$. Здесь λ играет роль постоянной решетки. Чем меньше λ, тем меньше d, тем больше дисперсия Д. Растет расстояние между дифракционными полосами. Измеряя это расстояние, определяем λ, а че-

рез него V—скорость распространения ультразвука в данной среде. (Подробно об этом смотри П, III стр. 130).

ПРОГРАММА САМОКОНТРОЛЯ К $И_{10}$.

Задания.	Решения.
$З_{10,1}$. Существует ли качественное принципиальное различие между явлениями интерференции и дифракции?	$Р_{10,11}$. Существует, хотя явление дифракции всегда сопровождается интерференцией. Различие в том, что при интерференции взаимодействуют пучки света от различных источников, а при дифракции — взаимодействуют отдельные участки фронта волны одного и того же источника.
	$Р_{10,12}$. Не существует, поскольку явление дифракции всегда сопровождается интерференцией.
$З_{10,2}$. Чем определяется наибольший порядок спектра, который можно наблюдать при помощи данной дифракционной решетки?	$Р_{10,21}$. Наибольший порядок спектра, который можно наблюдать при помощи данной решетки, определяется постоянной решетки и длиной волны света.
	$Р_{10,22}$. Наибольший порядок спектра, который можно наблюдать при помощи данной решетки, прямо пропорционален постоянной решетки и обратно пропорционален длине волны, что получается из формулы решетки при условии для Kmax $\sin\varphi = 1$.
$З_{10,3}$. Что называется разрешающей способностью дифракционной решетки? Написать формулу разрешающей способности.	$Р_{10,31}$. Разрешающей способностью решетки называется способность ее давать спектр. $$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kd.$$
	$Р_{10,32}$. Разрешающая способность решетки—это ее способность да-

вать раздельное изображение двух близких спектральных линий.

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN.$$

$З_{10,4}$. Сколько штрихов на 1 мм длины имеет дифракционная решетка, если зеленая линия ртути (λ=5461A°) в спектре первого порядка наблюдается под углом 19°,8′?

$Р_{10,41}$ $n=400$ мм$^{-1}$

$Р_{10,42}$ $n=300$ мм$^{-1}$

$Р_{10,43}$ $n=1{,}6 \cdot 10^{-3}$ мм$^{-1}$

$Р_{10,44}$. $n=60$ мм$^{-1}$

$З_{10,5}$. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию в спектре 3-го порядка накладывается красная линия гелия ($\lambda = 6{,}7 \cdot 10^{-5}$ см.) спектра 2-го порядка?

$Р_{10,51}$. $\lambda=10^{-4}$ см

$Р_{10,52}$. $\lambda=4{,}47 \cdot 10^{-5}$ см

$З_{10,6}$. Найти угловую дисперсию дифракционной решетки, период которой равен $5 \cdot 10^{-4}$ см, для $\lambda = 668$ ммк в спектре первого порядка.

$Р_{10,61}$ $Д=4{,}96 \cdot 10^{-6}$ м/рад

$Р_{10,42}$ $Д=2{,}02 \cdot 10^{5}$ м/рад

$З_{10,7}$. Найти линейную дисперсию в (мм/A°) дифракционной решетки предыдущей задачи, если фокусное расстояние линзы, проектирующий спектр на экран, равно 40 см.

$Р_{10,71}$ $Д_л = 5 \cdot 10^{-8}$мм/A°

$Р_{10,72}$ $Д_л = 8{,}08 \cdot 10^{6}$ см/м

$Р_{10,73}$ $Д_л = 8{,}08 \cdot 10^{-3}$мм/A

$З_{10,8}$. Чему равна постоянная дифракционной решетки шириной 2,5 см, чтобы в первом порядке был разрешен дублет натрия.

$\lambda_1 = 5890$ A° и

$\lambda_2 = 5896$ A°?

$Р_{10,81}$ d=390 см

$Р_{10,82}$ d=2460 см

$Р_{10,83}$ d=0,025 мм

$З_{6,1}$

$Р_{6,11}$. Неверно. См. стр. 171, К стр. 123—125, П. стр. 100—101.

$Р_{6,12}$. Верно.

$З_{6,2}$

$Р_{6,21}$. Верно.

$Р_{6,22}$. Верно. См. К стр. 123—125. П стр. 100—101.

$З_{6,3}$

$Р_{6,31}$ Верно. см. дополнительно, К стр. 119—120, П. стр. 102.

$З_{7,1}$

$Р_{7,11}$. Верно, см. дополнительно, К стр. 121, П. стр. 105—106.

$З_{7,2}$

$Р_{7,21}$ Верно.

$З_{7,3}$

$Р_{7,31}$. Неверно, см. стр. 175, П, стр. 106.

$Р_{7,32}$ Верно.

$З_{7,4}$.

$Р_{7,41}$. Неточно, см. стр. 176, П, стр. 107.

$Р_{7,42}$ Верно.

$З_{7,5}$.

$Р_{7,51}$. Неверно, вы ошиблись при получении формулы для радиуса n-ой зоны. Радиус зоны должен зависеть от номера зоны.

$Р_{7,52}$ Неверно найден r_1: неправильно извлечен корень квадратный.

$Р_{7,53}$ Верно.

$З_{7,6}$.

$Р_{7,61}$ Верно.

$Р_{7,62}$ Неверно, ошиблись при написании формулы радиуса зоны для случая сферической волны, см. Ф. и Т. стр. 74.

$Р_{7,63}$ Неверно. Вы вычисляли радиусы зон по формуле для случая плоской волны, а в данном случае волну нужно считать сферической, т. к. расстояние от источника до фронта волны невелико. См. Ф. и Т. стр. 74.

$З_{8,1}$

$Р_{8,11}$. Неверно, см. стр. 178, П, стр. 107—108.

$Р_{8,12}$ Верно.

$З_{8,2}$.

$Р_{8,21}$ Неверно, вы ошиблись в том, что в формуле радиуса к-той зоны (см. Ф. и Т. стр. 74) приняли значение $к=1$.

$Р_{8,22}$ Неверно, вы не привели расстояние между экраном и источником и длину волны света в одну систему единиц.

$Р_{8,23}$ Верно.

$З_{8,3}$.

$Р_{8,31}$. Неверно, см. стр. 179, П, стр. 109.

$Р_{8,32}$. Верно.

$З_{8,4}$.

$Р_{8,41}$ Неверно, вы ошибочно приняли расстояние между источником и экраном ВВ, а также расстояние между экранами ВВ и АА за 1, а эти расстояния равны $\frac{1}{2}$.

$Р_{8,42}$ Верно.

$З_{9,1}$.

$Р_{9,11}$. Верно, если к — четное число. См. стр. 182, К стр. 129, П, стр. 112.

$Р_{9,12}$. Верно для любого к.

$З_{9,2}$.

$Р_{9,21}$. Неверно. Вы ошиблись при записи условия минимума, см. стр. 182, К стр. 129, П, стр. 112.

$Р_{9,22}$. Неверно, см. стр. 182, К стр. 129, П, стр. 112.

$Р_{9,23}$. Неверно. Вы ошиблись в тригонометрической формуле при выражении искомой величины из треугольника.

$Р_{9,24}$ Верно.

$З_{9,3}$.

$Р_{9,31}$ Неверно, ошиблись при записи условия минимума. См. стр. 182, К стр. 129, П, стр. 112.

$Р_{9,32}$ Верно.

$З_{9,4}$.

$Р_{9,41}$. Неверно, см. стр. 181—183, П, стр. 114.

$Р_{9,42}$. Неверно, см. стр. 181—183, П, стр. 114.

$Р_{9,43}$ Верно.

$З_{10,1}$.

$Р_{10,11}$ Верно.

$Р_{10,12}$. Неверно, см. стр. 171—190.

$З_{10,2}$.

$Р_{10,21}$ Верно, но неполно, см. стр. 187.

$Р_{10,22}$ Верно.

$З_{10,3}$.

$Р_{10,31}$. Неверно, см. стр. 190, К стр. 135, П, стр. 118,

$Р_{10,32}$ Верно.

$З_{10,4}$.

$Р_{10,41}$ Неверно, ошиблись в записи условия главного максимума решетки. См. стр. 187, К стр. 131, П, стр. 116.

$Р_{10,42}$ Неверно, ошиблись в записи условия главного максимума решетки. См. стр. 187, К стр. 131, П, стр. 116.

$Р_{10,43}$ Неверно, ошиблись при выражении d из формулы решетки.

$Р_{10,44}$ Верно.

$З_{10,5}$.

$Р_{10,51}$ Неверно, ошиблись при подстановке порядков спектра в расчетную формулу.

$Р_{10,52}$ Верно.

$З_{10,6}$.

$Р_{10,61}$ Неверно. Неправильно записали формулу для угловой дисперсии. См. стр. 188.

$Р_{10,62}$ Верно.

$З_{10,7}$.

$Р_{10,71}$ Неверно, неправильно записали формулу для линейной дисперсии. См. стр. 189.

$Р_{10,72}$ Неверно, ответ получен не в требуемых единицах.

$Р_{10,73}$ Верно.

$З_{10,8}$.

$Р_{10,81}$ Неверно, вы неправильно записали формулу связи между шириной решетки, ее постоянной и числом штрихов. См. еще о постоянной решетки стр. 187, К. стр. 130, П стр. 117.

$Р_{10,82}$ Неверно, вы неправильно записали формулу связи между шириной решетки, ее постоянной и числом штрихов. См. еще о постоянной решетки, стр. 187, К стр. 130, П, стр. 117.

$Р_{10,83}$ Верно.

IV. БИБЛИОГРАФИЯ

И. Г. АНТИПИН

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ДЕМОНСТРАЦИОННОМУ ФИЗИЧЕСКОМУ ЭКСПЕРИМЕНТУ НА УРОКАХ ФИЗИКИ В VI КЛАССЕ ПО ПРОГРАММЕ 1968 ГОДА

В данной статье приведен список обязательных демонстраций на уроках физики в 6 классе по учебной программе 1968 года с небольшим дополнением.

По каждому опыту указан литературный источник, в котором описан данный опыт. Использованы только книги, вышедшие в 1950—1968 гг. В некоторых случаях приведено несколько источников, в которых описаны разные варианты этого опыта. Кроме того, по каждой демонстрации указаны характерные особенности этой демонстрации. Это поможет учителю выбрать нужный вариант опыта, исходя из оборудования физического кабинета и личного вкуса.

Для краткости текста названия книг даны в виде условных обозначений.

Ниже приводится список использованной при составлении «указателя» литературы и условные обозначения:

1. ФШ-1-60-75—Журнал «Физика в школе», № 1 за 1960 г., стр. 75.

2. Гор. II-154 — Горячкин, «Методика и техника физического эксперимента», изд. 1948 г., том. II, стр. 154.

3. ПД-37 — Покровский. «Демонстрационные опыты по физике в 6—7 кл.», изд. 1954 г., опыт № 37.

4. РЭ-II-73—Рудольф Герике (или Георг. Шпрокхоф), «Эксперимент по курсу элементарной физики», изд., 1960—1967 гг., том II, опыт № 73.

5. ШДЭ-23 — Шахмаев и Каменецкий. «Демонстрационные опыты по электричеству», изд. 1963 г., опыт 23.

6. ФЭ-1-58—Сборник «Физический эксперимент в школе», изд. 1962—1967 гг., часть 1, стр. 58.

7. ЖМ-154 — Г. И. Жерехов, «Демонстрационный эксперимент по механике», изд. 1951 г., стр. 154.

8. ЛД-II-74 — «Лекционные демонстрации по физике» под редакцией Млодзеевского, выпуск II, стр. 74.

9. ДТ-124 — Покровский и др., «Демонстрационные опыты по молекулярной физике», изд. 1959 г., стр. 124.

10. ГО-375 — Горячкин и Орехов, «Методика и техника физического эксперимента», изд. 1964 г., стр. 375.

11. Б-II-120 — Буров и др. «Демонстрационный эксперимент по физике», изд. 1968 г., том II, опыт № 120.

12. Гз-275 — Глазырин. «Самодельные приборы по физике», изд. 1, 1960 г., стр. 275.

Демонстрационные опыты по теме «Введение»

1. Механические явления ПД-85 — Колебания маятника Максвелла.

2. Тепловые явления.

Вылет пробки из пробирки при нагревании воды в ней до кипения.

3. Электрические явления. ГО-451 рис. 10—122. Получение индукционного тока при введении магнита в катушку.

4. Световые явления. ПД-219. Разложение белого света на цвета с помощью 3-гранной призмы.

5. Пример физического опыта. ГО-310-II. Зависимость скорости испарения от температуры и движения воздуха.

6. Сжимаемость газов. ГО-213-IV. Сжатие воздуха в насосе Шинца или в велосипедном насосе.

7. Изменение свойств тела при нагревании. ПД-103 — пропускание нагретого шара через кольцо. Гор. II-248—удлинение стержня при нагревании. ФШ-1-65-22. Удлинение проволоки при нагревании током. Гор. II-247. Выливание воды из колбы при нагревании и получение пузырей воздуха в воде при нагревании колбы. ГО-286—выход воздуха из колбы в воду при нагревании.

8. Многократное растворение марганцовки. ПД-86 — растворение 0,5 мг марганцовки в 200 г воды, 1 куб. см,

еще в стакане воды. ГО-242. Дробление мела, получ. масл. пленки.

9. Наличие промежутков между молекулами ПД-97. Смешение воды и спирта. Продувание воздуха через кирпич. ГО-244-1. Сжатие твердых тел (вбивание гвоздя, метки керном, испытание частей зубила).

10. Броуновское движение ЛД-1-37, ФШ-3-50-7г. — демонстрация броуновского движения с помощью микроскопа и проекционного фонаря ЛД-1-47. Модель броуновского движения с помощью электромагнитов. ДТ-20. ГО-248 — Механическая модель броуновского движения. Б-1-117.

11. Диффузия в твердых, жидких и газообразных телах.

ГО-248-1. Диффузия воды и раствора медного купороса.

ПД-89.

ПД-97. Диффузия водорода и воздуха с помощью двух мензурок.

Б-1-120. Диффузия паров брома с воздухом с помощью двух мензурок.

ГО-249-II. Диффузия аммиака с воздухом с помощью лакмусовой бумаги.

Б-1-121, Г-249. Диффузия газов (водорода и углекислого газа) через пористую перегородку.

ФШ-3-38-21. Диффузия твердого йода с парафином.

ФШ-3-60-97.

12. Опыты по сцеплению молекул. ГО-244—6 опытов по сцеплению твердых тел и жидкостей.

ПД-100. Сцепление стекла и воды.

ПД-101. Сцепление свинцовых цилиндров.

Б-1-123.

Б-1-122. Прилипание стеклянной пластинки к поверхности воды и керосина.

Б-1-124. Спрессовывание свинцовых опилок.

13. Воздух занимает весь предоставленный ему объем путем соединения накачанной и ненакачанной волейбольных камер.

14. ПД-1-140, ДТ-114. Испарение кристаллического йода.

15. ПД-110, ГО-297, РЭ-3-97. Конвекция воздуха с помощью вертушки и др.

16. Испарение жидкостей.

ГО-310. Зависимость скорости испарения от температуры и движения воздуха.

Гор. II-273. Сравнение испарения воды, эфира и керосина. ФШ-1-65-30.

Список демонстрационных опытов по теме «Движение и силы»

1. Демонстрация равномерного и неравномерного движения.

ПД-67. Движение самоходной тележки, отметка путей по метроному.

ГО-257. Движение цилиндра в трубке с маслом, равномерное и переменное движение тележки с капельницей.

ФШ-2-65-50. Движение тележки с электродвигателем.

ФШ-1-49-77. Равномерное движение бесконечной ленты от электродвигателя.

Б-1-1. Равномерное движение на приборе Румянцева.

2. Способы измерения времени. ГО-255. Приведено шесть способов измерения времени.

Гор. II-227. Самодельный метроном.

РЭ-1-16. Измерение времени реечным маятником.

3. Относительность движения. ПД-65. Движение малой тележки по длинной платформе на колесах.

ФШ-2-53-48. Заводная тележка и платформа на колесах.

Б-1-3. На тележке от прибора Румянцева.

4. Взаимодействие тел. Удар доски по двум подвешенным шарам разной массы.

Действие шарика, скатывающегося по наклонному желобу, на бруски разной массы.

ФШ-2-65-51. С самоходными фабричными тележками.

РЭ-1-132. Ученики на 2-х тележках тянут друг друга.

5. Инерция движения и покоя.

ПД-68, 69. Тележка на подвижной платформе.

Гор. II-230. Тележка с бруском.

Гор. II-229. Выбивание картона из-под шарика.

РЭ-1-31. Инерция шарика, бруска, подвешенного груза, жидкости, воздуха.

ГО-264. Со стопкой коробок, со стаканом с водой, шарик на картоне, насаживание молотка, тележка с бруском.

Б-1-10. Тележка с бруском от трибометра. Движение шарика по наклонной плоскости, искривление пути под действием магнита.

6. Сила тяготения. Притяжение одного магнита к другому, привязанному к нижней подставке (магнит висит в воздухе).

Действие магнита на магнитную стрелку на расстоянии.

Действие заряженной палочки на диэлектрическую стрелку на расстоянии.

7. Явление деформации.

Б-1-27. Различные виды упругих деформаций (сжатие, растяжение, изгиб). Сжатие губки под действием лежащего на ней груза. Прогибание линейки под действием груза.

Растяжение пружины и резины под действием груза.

8. Градуирование динамометра ГО-172. Использование пружины от ведерка Архимеда. ПД-26, 29, 27. Зависим. деформации пружины и линейки от приложенной силы.

9. Виды динамометров и их применение.

ПД-28, 30. Различные динамометры и измерение ими силы.

РЭ-1-48. Измерение сил разными весами.

ЖМ-47. Круглый демонстрационный динамометр.

10. Сложение сил.

РЭ-1-50, 49. На динамометрах и грузах через блоки.

ЖМ-85, 86. На вертикальном щите с помощью динамометра и резины.

ГО-267. На круглом демонстрационном динамометре.

11. Соударение двух упругих шаров, подвешенных на длинных нитях.

Шары лучше бильярдные.

12. Давление сжатого воздуха:

а) Воздух в чугунном цилиндре с поршнем поднимает тяжелый груз.

б) Движение гороха над электромагнитом. Удары горошин выводят из равновесия весы.

13. Давление газа при нормальных условиях.

а) ПД-102. Раздувание детского возд. шара под колоколом воздушного насоса в закрытой бутылке.

Выход картофельной пробки из пробирки под колоколом воздушного насоса.

14. Явление смачивания и несмачивания.

а) Опускание в воду чистой стеклянной и парафиновой палочки.

Обнаружение воды на них с помощью промакашки.

б) ПД-100. Прилипание стеклянной пластинки к воде (чистой и покрытой маслом).

Б-1-122.

в) Б-1-149. Наблюдение в проекции образования капли и краевых углов.

Наблюдение в проекции капель воды на смачивающей поверхности.

15. Форма мениска смачивающей и несмачивающей жидкости в проекции на экран (ЛД-1-91, ФШ-1-63-26, ДТ-77).

16. Явление капиллярности. Б-1-151. Явление в капиллярных трубках.

ФШ-3-56-71. Явление капиллярности на самодельных приборах.

17. Понятие давления и силы давления ПД-31. Гор. II-167.

Зависимость давления от площади опоры (на доске с гвоздями).

ФШ-3-55-63. Площадка на четырех динамометрах.

ГО-183. Доска с гвоздями, керн, зубило, игла и др.

ФШ-1-52-74. Использование индикатора для определения величины углубления бруска в песок.

18. Способы уменьшения и увеличения трения.

ПД-72, 73, 74. Зависимость силы трения от разных причин.

РЭ-1-133, 134. Движение коробки от удара и бруска под действием груза через блок.

РЭ-1-136, 137. Зависимость силы трения от материала и независимость от **площади опоры.**

РЭ-1-140, 141, 144. Трение на наклонной поверхности. Угол откоса. Трение скольжения, покоя.

Гор. II-229. Восемь опытов по трению.

ГО-259. Пять опытов по всей теме «Трение».

19. Шариковые и роликовые подшипники.

ПД-74, 75. Устройство и действие подшипников.
РЭ-1-145. Опыты с подшипниками.

Список демонстрационных опытов по теме «Давление жидкостей и газов» (Гидро- и аэростатика)

1. Передача давления твердыми телами ПД-32. С помощью резинового и деревянного цилиндра.

ГЗ-138. Гиря в резиновом ведерке.

2. Передача давления сыпучими телами ГЗ-138. Песок насыпают в резиновое ведерко.

3. Передача давления жидкостью. ПД-33, Гор. II-173. На шаре Паскаля с малыми отверстиями.

ПД-35. На резиновом ведерке с длинной стеклянной трубкой.

Гор. II-173. Уравновешиван. челов. столбом жидкости.

ГО-188. На шаре Паскаля и цилиндра с резин. дном.

ГЗ-139. С помощью резинового ведерка и груши.

ГЗ-143. На самодельных приборах (сосуд с тремя трубками, прибор из двух груш).

4. Изменение давления жидкости с глубиной.

ПД-36. На цилиндре с отверстиями. ПД-41, Гор. II-174. С помощью капсулы и манометра. ГО-190. Сосуд с отверстиями, универсальный прибор, цилиндр без дна, капсула.

ПД-37. Величина давления на дно; цилиндр без дна.

Гз-146. Давление на стенки резиновой трубки.

5. Независимость давления жидкости на дно сосуда от формы сосуда. Гор. II-171. На приборе «Парадокс Паскаля».

ГО-189. Парадокс, цилиндр с резиновым дном, универсальный самод. прибор.

ФШ-5-50-85. Увеличена эффективность парадокса Паскаля.

Гз-157. Самодельный прибор «Парадокса Паскаля».

6. Сообщающиеся сосуды.

ПД-38. Сообщающиеся сосуды разной формы.

ПД-39. Получение фонтана.

Гор. II-169. Два ламповых стекла, соединенных резиновой трубкой.

ГО-185. Самодельные сообщ. сосуды, фонтан, водомерное стекло, наклонный манометр.

ПД-40. Модель водопровода из трубок.
Гз-152. Модель водопровода из бутылки.
Гз-153. Модель шлюзов из фанеры и стекла.
7. Закон Паскаля для газов.
ПД-34. Шар с большим отверстием и с дымом.
ФШ-3-55-67. Принцип гидропневматики у самосвала
ФШ-4-55-63. Динамометр с самодельной капсулой.
ГО-214. С дымом и сосудом с тремя трубками—манометрами.
8. Барометры.
ПД-48. Ртутный чашечный и сифонный барометры.
ПД-49. Барометр-анероид под колоколом воздушного насоса.
Гор. II-201. Сравнение ртутных барометров.
9. Изменение атмосферного давления с высотой.
ГО-238. Примитивный альтиметр из бутылки.
Гз-173. Альтиметр чувствительный.
10. Поднятие воды за поршнем.
ПД-43. Использование цилиндра от шара Паскаля.
11. Опыт Торичелли.
ПД-44. Барометрическая трубка и демонстрационный метр.
Гор. II-199. Подробно описан опыт со ртутью.
ГО-217. Подробно описана техника этого опыта.
12. Поршневой воздушный насос.
Гор. II-205, ПД-54. Насос Шинца.
Гр. II-206. Насос Комовского.
Го-222. То же и водоструйный насос.
ПД-554. Насос Шинца с резиновым ведерком.
13. Водяные насосы.
Гз-169. Насосы всасывающие и нагнетательные.
ПД-52. Демонстрационные насосы.
Гор. II-197. То же, но с подсвечивающими экранами.
ГО-220. То же и модели для проекции.
14. Металлический манометр.
ПД-55. Металлический манометр и ртутный.
ГО-230. Самодельный из тонкостенной трубки.
15. Гидравлический пресс.
ГО-194. Принцип работы (насос и чугунный цилиндр), демонстрационный пресс.
16. Закон Архимеда для жидкостей.
Гз-161. На самодельном приборе (с ведерком). Два бруска в аквариуме.

ПД-56. Тело на резинке опускается в жидкость.

ПД-58. На ведерке Архимеда.

Гор. II-180. На технических весах, на весах Беранже и стаканом с отливом, на динамометре Бакушанского.

Гор. II-184. Поплавок Декарта (картез. водолаз).

Гз-165.

ГО-199. С рычагом, круглым динамометром и др.

ФШ-4-54-60. Самодельное ведерко и рычажные весы.

17. Плавание тел в жидкости.

ПД-59. Бруски из разного дерева на воде.

ПД-62. Картофелина в растворе соли.

Гор. 185. Ареометры, картофелина, яйцо и др. в растворе поваренной соли.

ГО-206. Плав. брусков, льда, водолаз, картофелина. Шар в холодной и горячей воде. Ареометры.

ФШ-4-54-61. Плавание судов.

18. Подъем затонувших судов.

ПД-64. Подъем груза с помощью резинового ведерка.

ГО-208. Модель понтонов.

Гз-166. Модель подводной лодки и подъем затонувшего судна.

19. Закон Архимеда для газов.

ПД-57. Весы с колбой в углекислом газе.

ПД-60. Плавание мыльных пузырей в углекислом газе.

ПД-63. Подъем мыльных пузырей с водородом.

Гор. II-186. Проверка закона на опыте.

Го-238. Все то же, но с методическими пояснениями.

20. Опыты, показывающие большую величину атмосферного давления.

ПД-45, ГО-233.

ПД-45, ГО-233. Опыт с Магдебурскими тарелками.

ПД-47, ГО-230. Продавливание стекла атмосферным давлением.

ГО-233. Подъем груза выкачиванием воздуха из цилиндра Герике.

21. Занимательные опыты по атмосферному давлению.

ПД-50, 51, ГО-216. Памятка. Ливер, сосуд с дырчатым дном, сифон, яйцо в бутылке.

ПД-53. Действие резиновой присоски.

ГО-231. Фонтан в пустоте.

ФШ-3-55. Забивка труб в землю атмосферным давлением.

Демонстрационные опыты по теме «Работа и мощность. Понятие об энергии»

1. Работа при подъеме и горизонтальном передвижении груза.

ПД-76. Нить с грузом накручив. на ось самодвижущей тележки.

ПД-77. Поднимание и передвигание груза динамометром.

Гор. II-233. Подъем и падение груза, падение воды.

ГО-271. С помощью динамометра и метра.

ЖМ-76. Дана методика опыта.

2. Мощность при подъеме груза.

ПД-78. Подъем груза самодвиж. тележкой.

ГО-272. С помощью динамометра.

3. Равновесие на рычагах.

ГО-271, ПД-81. Демонстрационный рычаг у доски.

Гор. II-237. Рычаг с грузами и динамометром.

РЭ-1-80. Примеры рычагов: клещи, щипцы и др.

РЭ-181-82. Двуплечий и одноплечий рычаги.

ПД-81.

4. Наклонная плоскость.

ПД-83. Подъем груза динамометром.

РЭ-1-91. Тележка на наклонной плоскости.

ГО-278. На обычном трибометре.

5. Потенциальная энергия сжатой пружины—на баллистическом пистолете.

6. Превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно.

ПД-84. Колебание нитяного маятника.

ПД-85. Гор. 235. Маятник Максвелла.

ПД-88. Водяной таран.

Гор. II-232. Различные способы превращения механической энергии.

РЭ-1-148. Различные виды маятников.

РЭ-149. Стрельба пружинным пистолетом вверх.

РЭ-1-151. Волчок или гироскоп.

Б-1-50. Вертикальный маятник, падение стального шарика на наковальню.

Б-1-51. Изменение энергии равно совершенной работе.

ГО-279. Движение тележки с помощью падающего груза, наливное и подливное колесо, подъем груза при движении тележки.

ЖМ-76. Фуникулер на наклонной плоскости, падение груза на стержне, вертикальный маятник, копер, гидравлический таран.

7. Гидравлические и ветряные двигатели.

ГО-280. Различные виды водяного и ветряного двигателей.

ПД-87. Водяная турбина.

ПД-86. Вращение сегнерова колеса.

8. ФШ-159-57. Все опыты по простым механизмам.

9. ФШ-2-61-47. Все опыты по данной теме.

СПИСОК

таблиц, диафильмов, диапозитивов и кинофильмов для использования на уроках физики в 6 кл. по новой программе.

Тема I

«Введение»

1. Кинофильмы

1. Молекулы и молекулярное движение (2 ч.).

2. Кинокольцовки и микрофрагменты: Молекулярное движение в жидкостях. Броуновское движение. Жидкий воздух. Флотация.

3. Диапозитивы: Величина молекулы.

Тема II

«Движение и силы»

1. Таблицы: Подшипники качения. Пневматический отбойный молоток. Схема жел.-дор. тормоза. Компрессор.

2. Кинофильмы: Сила давления и давление (1 ч.). Трение (1 ч.). Первый закон Ньютона. Всемирное тяготение.

3. Кинофрагменты и кинокольцовки: Роль смазки. Роликовые подшипники. Шариковые подшипники. Невесомость.

4. Диапозитивы: Лыжи. Танк. Относительное движение. Скорость. Галилео Галилей.

Тема III

«Давление жидкостей и газов»

1. Таблицы: Схема водяного отопления. Схема работы шлюза. Гидравлический домкрат. Гидравлический тормоз автомобиля. Подводная лодка. Подъем затонувших судов. Воздушный тормоз автомобиля. Барометр. Строение земной атмосферы. Водяной насос. Схема водопровода. Манометр. Гидравлический пресс.

2. Диапозитивы: Шлюзы. Выход судна из шлюза. Водопровод. Водомерное стекло. Схема шлюза. Схема колодца. Сифон. Магдебурские полушария. Альтиметр. Кессоны. Барометр-анероид. Атм. дав. на разн. высоте. Понтонный мост. Схема компрессора. Переправы на реке. Подводная лодка. Спуск водолаза. Аэростат. Стратостат.

3. Кинофильмы: Шлюзы. Гидравлический пресс. Водопровод. Плавание тел в жидкости. Использование атмосф. давления в технике. Воздухоплавание.

4. Кинофрагменты и кинокольцовки: Самосвал. Водолазные костюмы. Шлюзы. Погружение подводной лодки. Подъем подводной лодки. Поршневой всасывающий насос. Поршневой нагнетательный насос. Аэростат. Шарзонд.

Тема IV

«Работа, мощность, энергия»

1. Таблицы: Ветряной двигатель. Гидротурбина. Паровая турбина.

2. Кинофильмы: Устройство и работа башенного крана. Гидравлическая турбина. Ветряные двигатели. Покорение воздуха человеком. Использование воды человеком. Подъемные механизмы на стройке.

3. Микрофрагменты и кинокольцовки: Самосвал. Экскаватор «Малютка». Работа башенного крана. Механический путеукладчик. Автопогрузчик. Использование рычага в корчевателе. Земснаряд. Работа копра. Ветроэлектростанция. Ветродвигатель.

СОДЕРЖАНИЕ

I. МЕТОДИКА

Н. А. Демокритов. Инерционные «центробежные» механизмы в школьном курсе физики 7
О. Н. Мурадова. Изучение спектров в школьном курсе физики 31
Е. Г. Калашников. К изучению темы «Ядерная энергия». . 38
В. Ф. Лысов. Кружковые занятия по теме «Проводимость полупроводников» 49
Н. А. Демокритов. Методика проведения контрольных лабораторных работ по физике 69
Р. М. Разник, Н. А. Элатомцева. Объяснение видимого движения Солнца при помощи упрощенной модели небесной сферы 73
Н. И. Выгановский, В. В. Богданов. Демонстрация по электромагнетизму 80

II. КОНСУЛЬТАЦИЯ

Н. П. Грифцов. Движение материальной точки в поле центральной силы притяжения. 91

III. ПРОГРАММИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ

В. А. Каторгин, Ц. М. Рабинович, О. Н. Мурадова, М. Г. Гирина, В. В. Желателева, В. П. Головихина, В. Ф. Лысов, Н. П. Грифцов. Опыт использования электронных экзаменаторов 123
Г. Г. Трузин, В. И. Поликарпов. Карманный экзаменатор 163
Ц. М. Рабинович, О. Н. Мурадова. Дифракция света. Глава из учебного пособия «Оптика» с программой самоконтроля 170

IV. БИБЛИОГРАФИЯ

И. Г. Антипин. Указатель литературы по демонстрационному физическому эксперименту на уроках физики в 6 классе по программе 1968 года 199

ФИЗИКА В ШКОЛЕ И ВУЗЕ

Ответ. редактор **Циля Матусовна Рабинович**

Техредактор **Ю. В. Лаврентьева**

Сдано в набор 24/VII 1969 г. Подписано к печати 29/I 1970 г.
ЗМ03741. Заказ № 5213. Тираж 1000 экз.

Объем 13,25 п. л., формат $84\times108^{1}/_{32}$. Цена 80 коп.

Ульяновская областная типография
областного управления по печати,
г. Ульяновск, ул. Ленина 114.

80 коп.